



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Cuantificación de biogás generado a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de la cascarilla de arroz, mediante el modelo de Gompertz

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Químico

Autor:

Diego Javier Trelles Trelles

CI: 0105167134

Director:

Ing. Jorge Marcelo Sigüencia Ávila Mgt.

CI: 0301837837

Cuenca – Ecuador

15/05/2019



Resumen:

En este proyecto de investigación se realizó la cuantificación de biogás a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de cascarilla de arroz, utilizando inóculos de cerdo y vaca, mediante el modelo de Gompertz.

La generación del biogás se realizó en biodigestores discontinuos manteniendo constante el volumen de hidrólizado de la cascarilla de arroz. La separación del metano del dióxido de carbono se realizó usando una solución de hidróxido de potasio al 5% la cual precipita el dióxido de carbono y el volumen desplazado va a ser equivalente al volumen de metano generado.

Se logró generar y cuantificar biogás a partir de los Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de cascarilla de arroz mediante el modelo de Gompertz, mediante el cual se obtuvo mayor volumen de biogás usando el inóculo de vaca, dándonos los mejores parámetros cinéticos para hacer más eficiente este proceso. Realizando una análisis estadístico de las variables involucradas en el proceso, se determinó que la variable que influye en el proceso de generación de biogás es la temperatura y la relación entre esta con la concentración de inóculo.

En conclusión los Azúcares Reductores Totales (ART) constituyen un sustrato para que las bacterias metanogénicas se desarrollen y produzcan biogás, representando $3'105.183,17 \text{ MJ/m}^3$ y $862,62 \text{ MW/h}$ con el biogás obtenido con el inóculo de vaca y $2'775.095,37 \text{ MJ/m}^3$ y $770,92 \text{ MW/h}$ con el inóculo de cerdo estos valores se pueden llegar a obtener si se trabaja con todo el residuo disponible de cascarilla de arroz en el Ecuador.

Palabras claves: Biogás. Modelo de Gompertz. Cascarilla de arroz. Azúcares Reductores Totales (ART). Inóculo. Energía.



Abstract:

In this research project the quantification of biogas was made from Total Sugars (ART), from the hydrolysis of rice husks, using pig and cow inocula, using the Gompertz model.

The generation of the biogas was carried out in discontinuous biodigesters keeping the volume of hydrolysis of the rice husk constant. The separation of methane from carbon dioxide was carried out using a 5% potassium hydroxide solution which precipitates carbon dioxide and the volume displaced will be equivalent to the volume of methane generated.

It was possible to generate and quantify biogas from Total Sugars (ART) of rice husk hydrolyzate using the Gompertz model, through which a greater volume of biogas was obtained using the cow inoculum, giving us the best kinetic parameters to make more efficient this process. By performing a statistical analysis of the variables involved in the process, it was determined that the variable that influences the biogas generation process is the temperature and the relationship between this and the concentration of inoculum.

In conclusion, the Total Reductive Sugars (ART) constitute a substrate for the methanogenic bacteria to develop and produce biogas, representing 3,105,183.17 MJ / m³ and 862.62 MW / h with the biogas obtained with the cow inoculum and 2 775,095.37 MJ / m³ and 770.92 MW / h with the pork inoculum, these values can be obtained if working with all the available residue of rice husks in Ecuador.

Key Words: Biogas. Gompertz Model. Rice Cask. Total Reductive Sugars (ART). Inoculum. Energy.



CONTENIDO

ANTECEDENTES	13
INTRODUCCION.....	13
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
1. CAPÍTULO I: CASCARILLA DE ARROZ	16
1.1 DEFINICIÓN.....	16
1.2 COMPOSICIÓN ORGÁNICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ	16
1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ	16
1.4 PRODUCCIÓN DE ARROZ EN EL ECUADOR.....	17
1.5 USOS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.....	18
1.5 TRANSFORMACIÓN DE CELULOSA A GLUCOSA	19
1.6 HIDRÓLISIS ÁCIDICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ	19
2. CAPÍTULO II: BIOGÁS	20
2.1 DESCRIPCIÓN DEL BIOGÁS	20
2.2 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS	20
2.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	21
2.3.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL MUNDIAL	21
2.3.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL ECUADOR	21
2.3.2.1 PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN QUITO:	21
2.3.2.2 PROYECTO BIOGÁS PICHACAY, CUENCA:.....	22
2.4 USOS DEL BIOGÁS	22
2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIOGÁS.....	24
3. CAPÍTULO III: DIGESTIÓN ANAEROBIA	25
3.1 DEFINICIÓN	25
3.2 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	26
3.2.1 ETAPA DE HIDRÓLISIS.....	26
3.2.2 ETAPA DE ACIDOGÉNESIS	26
3.2.3 ETAPA DE ACETOGÉNESIS	27
3.2.4 ETAPA DE METANOGENÉESIS.....	27
3.3 MICROBIOLOGÍA DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS	28
3.4 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) (PRODUCCIÓN DE BIOGÁS)	29



3.5 PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN PBM	30
3.5.1 SUSTRATO	30
3.5.2 INÓCULO	30
3.5.2.1 ESTIÉRCOL COMO INÓCULO	30
3.5.2.1.1 ESTIÉRCOL BOVINO	31
3.5.2.1.2 ESTIÉRCOL PORCINO	31
3.5.2.1.3 COMPOSICIÓN DEL ESTIÉRCOL	31
3.5.3 CAPACIDAD DEL REACTOR	32
3.5.4 TEMPERATURA	32
3.5.5 pH Y ALCALINIDAD	33
3.5.6 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA	33
3.5.7 CONTENIDO DE SÓLIDOS TOTALES (ST)	33
3.5.8 INHIBIDORES	34
3.5.9 SOLUCIÓN DE NUTRIENTES	35
3.5.10 RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO C/N	36
3.5.11 RELACIÓN SUSTRATO/INÓCULO	36
3.5.12 Humedad	37
3.6 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS (METANO)	37
3.6.1 MÉTODOS MANOMÉTRICOS	37
3.6.2 MÉTODOS VOLUMÉTRICOS	37
4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	39
4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	40
4.2 RECOLECCIÓN DEL INÓCULO (ESTIÉRCOL DE VACA)	40
4.4 RECOLECCIÓN DEL INÓCULO (ESTIÉRCOL DE CERDO)	41
4.5 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART CON INÓCULO DE EXCREMENTO DE VACA	41
4.6 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARRILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE CERDO	44
4.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACION ENTRE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACION DE BIOGÁS	45
4.8 MATERIALES Y REACTIVOS UTILIZADOS PARA EMPLEAR EL SISTEMA DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BIOGÁS	46
4.8.1 MATERIALES	46
4.8.2 REACTIVOS	46
4.8.3 SISTEMA ARMADO DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS	46



5. CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUCIONES	48
5.1 RESULTADOS	48
5.1.1 GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE VACA	48
5.1.1.1 CÁLCULO DE BIOGÁS EN UN TIEMPO DE 20 DÍAS UTILIZANDO LA ECUACIÓN MODIFICADA DE GOMPERTZ PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA.	50
5.1.1.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS CON INÓCULO DE VACA	51
5.1.1.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	51
5.1.1.2.2 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y VARIABLE DE RESPUESTA PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA	52
5.1.1.2.2.1 EFECTOS ESTIMADOS PARA BIOGÁS (ml) PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA.	52
5.1.1.2.2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BIOGÁS PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA	52
5.1.1.2.2.3 COEFICIENTE DE REGRESIÓN PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA	53
5.1.2 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE CERDO	54
5.1.2.1 CÁLCULO DE BIOGÁS EN UN TIEMPO DE 20 DÍAS UTILIZANDO LA ECUACIÓN MODIFICADA DE GOMPERTZ PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO.	56
5.1.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS CON INÓCULO DE CERDO	57
5.1.2.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO.	57
5.1.2.3 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y VARIABLE DE RESPUESTA	58
5.1.2.3.1 Efectos estimados para Biogás (ml) para experimento con inóculo de cerdo.	58
5.1.2.3.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO	58
5.1.2.3.3 COEFICIENTE DE REGRESIÓN PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO	59
5.1.3 CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS DE ACUERDO AL RESIDUO NACIONAL DE CASCARILLA DE ARROZ.	60
5.1.3.1 CANTIDAD DE BIOGÁS QUE SE OBTIENE CON INÓCULO DE VACA	60
5.1.3.2 CANTIDAD DE ENERGÍA QUE SE OBTIENE A PARTIR DEL BIOGÁS	61



5.1.3.3	CANTIDAD DE BIOGÁS QUE SE OBTIENE CON INÓCULO DE CERDO	61
5.1.3.4	CANTIDAD DE ENERGÍA QUE SE OBTIENE A PARTIR DEL BIOGÁS	61
5.1.3.5	CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA DEL BIOGÁS	62
5.1.3.5.1	CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL INÓCULO DE VACA.	62
5.1.3.5.2	CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL INÓCULO DE CERDO.	62
5.2	DISCUSIONES	63
6.	CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES	70
6.1	CONCLUSIONES	70
6.2	RECOMENDACIONES	71
7.	BIBLIOGRAFÍA	73
	ANEXOS	77

INDICE DE TABLAS:

Tabla 1.	Propiedades Físicas de la cáscara de arroz.	17
Tabla 2.	Descripción de la Producción de arroz en el Ecuador.	18
Tabla 3.	Composición del Biogás.	20
Tabla 4.	Ventajas y desventajas del biogás.	24
Tabla 5.	Composición del Estiércol del ganado vacuno.	31
Tabla 6.	Concentraciones críticas de varios inhibidores.	35
Tabla 7.	Composición de la solución de nutrientes recomendada para el ensayo.	35
Tabla 8.	Composición del Hidrólizado de cascarilla de Arroz.	39
Tabla 9.	Experimento 1 generación de biogás con excremento de vaca.	42
Tabla 10.	Descripción del esquema del método volumétrico empleado.	43
Tabla 11.	Experimento 2 Generación de Biogás con excremento de cerdo.	44
Tabla 12.	Variables para el análisis estadístico.	45
Tabla 13.	Variable de Respuesta del análisis estadístico.	45
Tabla 14.	Materiales utilizados para el sistema de generación y cuantificación de biogás.	46
Tabla 15.	Reactivos.	46
Tabla 16.	Generación Acumulada de Biogás (ml) a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de vaca.	49
Tabla 17.	Tabla resumen del cálculo de la cantidad acumulada de biogás utilizando la ecuación de Gompertz.	51
Tabla 18.	Variables para el análisis estadístico para el experimento con inóculo de vaca.	51



Tabla 19. Variable de Respuesta del análisis estadístico para el experimento con inóculo de vaca.	52
Tabla 20. Efectos estimados para Biogás (ml) para el experimento con inóculo de vaca.	52
Tabla 21. Análisis de Varianza para Biogás para el experimento con inóculo de vaca.	52
Tabla 22. Coef. de regresión para biogás para experimento con inóculo de vaca.	53
Tabla 23. Generación Acumulada de Biogás (ml) a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de cerdo.	55
Tabla 24. Tabla resumen del cálculo de la cantidad acumulada de biogás utilizando la ecuación de Gompertz para experimento con inóculo de cerdo.	57
Tabla 25. Variables para el análisis estadístico para experimento con inóculo de cerdo.	57
Tabla 26. Variable de Respuesta del análisis estadístico para experimento con inóculo de cerdo.	58
Tabla 27. Efectos estimados para Biogás (ml) para experimento con inóculo de cerdo.	58
Tabla 28. Análisis de Varianza para Biogás para experimento con inóculo de cerdo.	58
Tabla 29. Coef. de regresión para biogás para experimento con inóculo de cerdo.	59
Tabla 30. Cantidad de arroz y cascarilla de arroz disponible.	60
Tabla 31. Tabla resumen de la cantidad de biogás y energía que se puede obtener a partir de la cascarilla de arroz disponible en el Ecuador.	62

INDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1. Esquema de los usos de biogás.	24
Ilustración 2. Secuencia metabólica y grupos microbianos que intervienen en la digestión anaerobia.	25
Ilustración 3. Grupos bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia.	28
Ilustración 4. Contenido de materia orgánica y algunos micronutrientes en función del porcentaje de materia seca de diferentes animales domésticos y el humano.	32
Ilustración 5. Método manométrico (Equipo OxiTop®).	38
Ilustración 6. Esquema del montaje experimental del método volumétrico.	38
Ilustración 7. Mapa donde se encuentra ubicada la Granja de la Universidad Politécnica Salesiana.	41
Ilustración 8. Esquema del método volumétrico utilizado.	43
Ilustración 9. Sistema de generación y cuantificación Biogás.	47

INDICE DE GRÁFICOS:

Gráfico. 1. Generación Acumulada de Biogás a partir de Azúcares Reductores Totales de Hidrólizados de cascarilla de arroz con inóculo de vaca.	48
Gráfico. 2. Diagrama de Pareto Estandarizado para Biogás con Inóculo de Vaca.	53
Gráfico. 3. Generación Acumulada de Biogás a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de cerdo.	54
Gráfico. 4. Diagrama de Pareto Estandarizado para Biogás con Inóculo de Cerdo.	59



INDICE DE ECUACIONES:


Ecuación 1. Ecuación modificada de Gompertz.....	44
Ecuación 2. Ecuación de regresión para el biogás con inóculo de vaca.....	53
Ecuación 3. Ecuación de regresión para el biogás con inóculo de cerdo.....	59
Ecuación 4. Toneladas métricas (Tm) de ART.....	60
Ecuación 5. Cantidad de biogás que se obtiene a partir de las Tm de ART.	61
Ecuación 6. Cantidad de Energía que se obtiene a partir del biogás.	61
Ecuación 7. Cantidad de Energía Eléctrica que se obtiene a partir de la Energía obtenida del biogás.	62



Cláusula de Propiedad Intelectual

Diego Javier Trelles Trelles autor del trabajo de titulación "Cuantificación de biogás generado a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de cascarilla de arroz, mediante el modelo de Gompertz", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de mayo de 2019



Diego Javier Trelles Trelles

C.I: 0105167134



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Diego Javier Trelles Trelles en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Cuantificación de biogás generado a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de cascarilla de arroz, mediante el modelo de Gompertz", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de mayo de 2019

Diego Javier Trelles Trelles

C.I: 0105167134



DEDICATORIA

Agradezco a Dios por darme la vida y la salud para poder terminar este proyecto, a toda mi familia por siempre apoyarme en cada momento e impulsarme a ser cada día un mejor profesional. A mis padres Félix y Flor Trelles que me han guiado y me han brindado todo su apoyo para poder culminar esta etapa de mi vida. A mis abuelitos Rosa Astudillo y Flavio Trelles que aunque ya no se encuentren conmigo, desde el cielo me han estado cuidando. A mis hermanas Sandra, Noemí, Nelly, Maritza, Estefanía y a mi hermano Marco, por su respaldo, apoyo, consejos y motivación a lo largo de mi carrera. A mí prometida Karen por su amor, ayuda, motivación y su apoyo constante durante cada día de la duración de este proyecto y que siempre me ha estado alentando hasta el final. A Doña Ana, que cada día me ha estado animando para conseguir este objetivo y finalmente a mi querida hija Viviana Valentina, por ser el pequeño motor que me motiva a ser mejor persona cada día y por darme el amor más puro que se pueda tener.

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Jorge Sigüencia, por su apoyo, contribución y ayuda brindada durante la realización de este proyecto. A mis compañeros de clase que me han enseñado a superarme cada día y a ser mejor persona, a mis amigos que me han estado motivando durante este trayecto de mi vida, en especial a mi gran y querido amigo Juan Pablo Guamán que me ayudo a obtener las muestras del excremento de vaca y me ha brindado siempre su amistad y apoyo, a los profesores de la Universidad de Cuenca, que me han compartido sus conocimientos y me han ayudado a ser un mejor profesional. Y a todas las personas que han contribuido a lo largo de mi vida para que llegue a conseguir este logro.



ANTECEDENTES

En la Universidad de Cuenca el grupo de Biomasa, Bioenergía Y Gestión Energética del departamento de Química Aplicada y Sistemas de Producción viene realizando investigaciones relacionadas con la generación de nuevas fuentes alternativas de energía, las cuales en el futuro sean fuentes sustentables y sostenibles para el uso de la sociedad.

La biomasa es definida por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) como la energía solar captada y almacenada por los organismos fotosintéticos como las plantas (INER., 2019). La biomasa generada en el Ecuador proviene de los desechos agrícolas y esta es considerada como una fuente de energía renovable con un gran potencial para su uso, el cual podría tener un lugar relevante en los sistemas forestales y agropecuarios (INER., 2019).

INTRODUCCION

En la actualidad existe un desequilibrio ambiental, generado por el elevado crecimiento demográfico y por ende el aumento en la demanda de recursos naturales. Especialmente en los recursos energéticos que son de origen fósil, el uso de estos provocan graves consecuencias como: la contaminación del suelo, aire, agua y el calentamiento global producido por la acumulación de gases de Efecto invernadero, tomando en cuenta que muchas de las reservas de combustibles de origen fósil son limitadas (Lorente, Collaguazo, Herrera, & Lastre, 2018, pág. 1).

La matriz energética Mundial, muestra cómo se utilizan los combustibles de origen fósil como: carbón, petróleo y gas natural. En el 2014, estaba conformada por un 13,3% de Fuentes Renovables de Energía (FRE) y un 86.7% de combustibles de origen fósil (Díaz, Miranda, & Almirall, 2016, pág. 326).

Se han realizado estudios para analizar los impactos que pueden causar los gases de efecto invernadero y el calentamiento global en el planeta. Que pueden afectar significativamente en los ecosistemas vivientes y sobre la calidad de vida que llevan los humanos (Viglizzo, 2016, pág. 159). Además se generan millones de toneladas de residuos orgánicos que pueden ser biodegradables, los cuales son originados por las grandes industrias del sector agroindustrial. La gran mayoría de estos desechos son destinados a los rellenos sanitarios (Rodríguez Pachón & García Cepeda, 2017, pág. 13).



Es por ello que es importante promover el desarrollo de nuevas fuentes alternativas de energía, como son los biocombustibles; dentro de los cuales se encuentra la producción de biogás, ya sea a partir de desechos agrícolas, estiércol o efluentes de origen industrial principalmente.

La presente investigación utiliza la cascarilla de arroz, para la generación de biogás, el mismo que se considera como un desecho agrícola con poco valor comercial.

La producción de arroz en el Ecuador para el año 2016 fue de 1'534.537,00 toneladas métricas (Tm), según el informe de la Corporación Financiera Nacional en el año 2018.

Algunas piladoras de arroz utilizan la cascarilla como combustible, empresas agropecuarias como alimento para el ganado bovino y aves de corral. La cascarilla también es quemada para obtener el pulitón que es un abrasivo que se emplea en el lavado de utensilios (Cotrino, y otros, 2016, págs. 36-37).

En la actualidad el biogás, tiene un valor agregado en el sector ladrillero y cementero del país, según la información del MAGAP¹, el cual menciona que solo un 35% de la cascarilla de arroz está siendo utilizada y que el resto es quemada (Lino Alvarado & Ochoa Tenorio, 2017, pág. 13).

Para la generación de biogás se realiza un tratamiento previo a la cascarilla para obtener los Azúcares Reductores Totales (ART), mediante hidrólisis ácida. Cuando se somete a estos tratamientos, la celulosa al estar formado por unidades de Beta-D-Glucopyranosa da como resultados una solución de azúcares con contenido de moléculas de glucosa (Romero Espinoza, 2018, pág. 17) a los cuales se los considera como sustrato en el que se desarrollan microorganismos metanogénicos del tipo heterótrofos encargados de utilizar la materia orgánica como fuente de carbono y energía para la generación de biogás (Parra Huertas, 2015, pág. 145).

Asimismo, se puede cuantificar el volumen de biogás generado utilizando modelos cinéticos como el de Gompertz, que permite determinar la biodigestión anaerobia y la producción máxima de biogás de varios sustratos que se pueden encontrar en forma sólida o líquida (Cárdenas Cleves, Parra Orobio, Torres Lozada, & Vásquez Franco, 2016, pág. 98) y determinar las condiciones óptimas para la generación de biogás.

¹ Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.



OBJETIVO GENERAL

- Cuantificar el biogás generado a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) del hidrólizado de cascarilla de arroz, mediante el modelo de Gompertz.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las condiciones óptimas de cantidad de inóculo y tipo de inóculo. para la generación de biogás.
- Realizar un análisis estadístico de las variables implicadas en la generación del biogás obtenido.
- Cuantificar el potencial de generación de biogás de acuerdo al residuo nacional de cascarilla de arroz.



1. CAPÍTULO I: CASCARILLA DE ARROZ

1.1 DEFINICIÓN

Se puede mencionar que el segundo grano más importante que se siembra y cosecha en el mundo es el arroz. Es un cultivo que se puede encontrar en varios países, una característica de este es que su cáscara representa un 20% a 33% del grano esto va a depender de su especie o variedad. Se considera que la cascarilla de arroz es un residuo lignocelulósico abundante, el cual en su estructura contiene alrededor de un 10,9% de lignina, 51,5% de celulosa, 21% de hemicelulosa y un 16,6% de cenizas (Rojas Sanchez, 2018, pág. 27).

Un subproducto que se obtiene de la molienda o trituración del grano de arroz que proviene de los campos agrícolas es la cascarilla. Esta cascarilla es como el caparazón del grano de arroz, por lo que se encuentra en la parte externa del grano maduro (Demera Centeno & Bogar., 2018, pág. 13). La cascarilla es un tejido de tipo vegetal el cual está formado por sílice y celulosa, los cuales son 2 elementos que van influir en el rendimiento para el uso como combustible (Rojas Sanchez, 2018, pág. 27).

1.2 COMPOSICIÓN ORGÁNICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La cascarilla de arroz posee una composición orgánica semejante a muchas de las fibras orgánicas, ya que contiene lignina, celulosa, compuestos nitrogenados, hemicelulosa, lípidos y ácidos orgánicos. Los carbohidratos que mayormente se encuentran formando la cáscara de arroz son la hemicelulosa y celulosa, ya que el contenido de hemicelulosa se encuentra alrededor de 16-22% y de celulosa entre un 28-49%. También se puede encontrar otros polisacáridos además de la celulosa como son: arabinosa, xilosa y galactosa. El elemento o compuesto responsable de dar rigidez a la estructura del grano es la lignina cuyo porcentaje se encuentra entre el 19% - 25% (Demera Centeno & Bogar., 2018, pág. 16).

1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La cáscara de arroz presenta diferentes características o propiedades físicas como son las dimensiones del grano de espécimen cariósido que posee las siguientes: un ancho de grano que se encuentra entre 2 a 4 milímetros, una longitud que esta alrededor de 4 a 14 milímetros y un espesor promedio de 50 micrómetros. También tiene otra característica como es el peso el cual se puede encontrar entre 2,94 a 3,56 miligramos (Romero Espinoza, 2018, pág. 15).



Mediante un análisis inmediato se puede caracterizar o determinar las propiedades físicas de la cáscara de arroz, para el cual se utiliza un horno en el que la temperatura va aumentando y a medida que se realiza este procedimiento se toma datos de como el material va perdiendo peso. En la Tabla 1 se detallan las propiedades físicas de la cascarilla de arroz (Rojas Sanchez, 2018, pág. 28).

Tabla 1. Propiedades Físicas de la cáscara de arroz.

PROPIEDAD FÍSICA	DESCRIPCIÓN	VALOR
Poder calorífico	Cantidad de energía que la unidad de masa libera al producirse una reacción química.	3 650 kcal/kg o 15 275 kJ/kg
Humedad	En estado seco, la cascarilla absorbe agua hasta el punto en que se equilibren su propio contenido de agua y la humedad relativa del aire.	8,88%
Materia volátil	Compuestos de gases y vapores, parte de la biomasa que se libera cuando el material se calienta entre 400°C y 500 °C)	64,70%
Contenido de cenizas	Residuo obtenido después de la combustión completa de la cascarilla formada por todos los óxidos de sus minerales.	13,06%
Carbono fijo	Porción de combustible del sólido que queda después de la remoción de humedad, cenizas y material volátil.	13,36%
Porosidad	Se distingue el volumen de aire de un lecho de cascarilla y el volumen de aire o de los poros en sí.	54%
Densidad	Resultado del cociente de la masa entre la resta de la densidad aparente menos el volumen de todos los poros contenidos en una cascarilla, obteniendo.	1 420 kg/m ³
Conductividad térmica	La cascarilla posee una muy buena capacidad aislante.	0,03 605 W/Mk

Fuente: (Rojas Sanchez, 2018, pág. 28)

1.4 PRODUCCIÓN DE ARROZ EN EL ECUADOR

El arroz es considerado un cultivo de tipo semi-acuático que se encuentra en la zona costera del Ecuador, ya que este cultivo se beneficia del clima y la geografía de la región costa para su desarrollo. Según la “Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua -ESPAC-“, los agro productores de este cultivo están ubicados mayormente en las provincias de los Ríos con una superficie de cosecha de 109.957,00 ha y la provincia de Guayas con 237.316,00 ha (MAGAP., 2014, pág. 1).



Estas dos provincias son las que mayor cultivo de arroz presentan por lo que la producción que estas 2 generan es un 34% y 61% respectivamente del valor total de la producción anual del Ecuador (promedio 2002-2009), el porcentaje restante que sería el 5% pertenece a los valles cálidos que se encuentran en las provincias de la Amazonía y de la Sierra y a las demás provincias de la región costa (MAGAP., 2014, pág. 1).

La producción de arroz en el Ecuador para el año 2016 fue de 1'534.537,00 toneladas métricas (Tm), según el informe de la Corporación Financiera Nacional en el año 2018. Como se puede observar en la tabla N°2 el desglose de la cantidad de arroz producido por las provincias del Guayas, Manabí, Los Ríos y otras provincias que son productoras de arroz en menor escala que las dos primeras mencionadas (Corporación Financiera Nacional (CFN), 2018, pág. 9).

Tabla 2. Descripción de la Producción de arroz en el Ecuador.

Año	Provincia	Superficie de Cosecha (ha)	Producción (Tm)	Rendimiento (Tm/ha)	Porcentaje Nacional
2016	Guayas	237.217,00	1'035.344,00	4,4	67%
	Manabí	107.277,00	421.483,00	3,9	27%
	Los Ríos	13.740,00	55.536,00	4,0	4%
	Resto de Provincias	7.959,00	22.175,00	2,8	1%
	Total General	366.194,00	1'534.537,00		100%

Fuente: INEC - ESPAC 2016

1.5 USOS DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La cascarilla se puede utilizar como combustible, lo que puede ser un importante aporte en la conservación de recursos. Esto significa un avance en el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente y económicas (Rojas Sanchez, 2018, pág. 30). Se puede decir que la cáscara de arroz puede ser utilizada o aplicada para diferentes propósitos según el porcentaje que se haya extraído, en las que se encuentran y destacan: para gasificación mixta, para generación de energía, para producir abono por su contenido de fertilizante natural y para la utilización en máquinas de vapor o semifijas como combustible (Romero Espinoza, 2018, pág. 16).



En el campo de la construcción un compuesto que se extrae de la cascarilla de arroz es el dióxido de silicio, el cual ha denotado una gran potencial para la aplicación en la fabricación de cementos. Esta y otras características antes mencionadas nos hace considerar que la cáscara de arroz es un material que tiene potencial y ofrece un alternativa de gran posibilidad para poder realizar construcciones con un costo más bajo (Demera Centeno & Bogar., 2018, págs. 13-14)

De acuerdo con el MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería; Acuacultura y Pesca), el 35% del total de la cascarilla de arroz es utilizado por la industria florícola y por criaderos de animales, por lo tanto el 75% restante se agrupa de la siguiente manera:

- 50% es quemado dentro de las piladoras
- 15% es desechado en los bordes de las carreteras
- 15% es quemado en terrenos aislados
- 5% es desechado en ríos
- 5% se pierde a causa del viento.

1.5 TRANSFORMACIÓN DE CELULOSA A GLUCOSA

La celulosa se puede transformar a glucosa, la cual forma estructuras o arreglos cristalinos por medio de enlaces intra e inter moleculares al hidrógeno con enlaces β -1,4glicosídicos, lo que le confiere como característica que posea un nivel elevado de insolubilidad, se degrada en pequeñísimas moléculas para que esta pueda ser transformada en glucosa. Cuando se somete a tratamientos de hidrólisis o electrolisis la celulosa al estar formado por unidades de Beta-D-Glucopyranosa, dará como resultados una solución de azúcares con contenido de moléculas de glucosa (Romero Espinoza, 2018, pág. 17).

1.6 HIDRÓLISIS ÁCIDA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

El pre tratamiento químico con soluciones de ácido sulfúrico provoca la hidrólisis de las hemicelulosas y de parte de la celulosa amorfa. Mediante este tratamiento químico se obtiene una buena recuperación de hemicelulosas en forma de monómeros en la fracción líquida y una fracción sólida con elevada concentración de celulosa. Ya que este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas y condiciones ácidas se genera una degradación de los azúcares liberados dando como resultado productos no deseados



como: el Furfural y el 5-Hidroximetilfurfural o HMF (Siguencia, Soler, & Menéndez, 2018).

2. CAPÍTULO II: BIOGÁS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL BIOGÁS

El biogás contiene gas metano como principal componente, el cual fue utilizado por primera vez por los chinos y persas para la generación de calor. En 1776 Volta descubrió que el metano es el principal componente en el biogás, después de 100 años descubrió que la formación de metano se realizaba por la intervención de microorganismos. En 1887 Hoppe-Seyler confirmó que el CH_4^2 se generaba a partir de acetatos. En 1888 Gayon obtuvo de biogás mediante la mezcla de excremento de vacas y caballos en agua a una temperatura de trabajo de 35°C (Padilla Sevillano & Rivero Méndez, 2016, pág. 37).

La utilización de biogás aumentó después de la segunda guerra mundial, ya que en esta época se construyeron cerca de 40 biodigestores en Alemania, pero los bajos precios de los combustibles de origen fósil hicieron que se frene el desarrollo del biogás. En 1970 por la crisis del petróleo se comenzó nuevamente a construir biodigestores, en 1991 Alemania se realizaba pagos por la energía generada por el biogás por parte de los agricultores. En la actualidad se ha considerado un aumento en el precio del biogás, esto debido a los cierres de las plantas nucleares. Desde el 2002 comenzó el proceso de cierre de dichas plantas, el cual durará hasta el año 2030 (Escobar Morales, 2015, pág. 8)

2.2 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

La composición y propiedades varían en gran medida según el tipo de materia prima, el sistema de digestión y parámetros ambientales, a continuación se describe la composición del biogás:

Tabla 3. Composición del Biogás.

Compuesto	Contenido (% vol.)
Metano (CH_4)	50-75
Dióxido de carbono (CO_2)	25-45

² Metano



Vapor de agua (H ₂ O)	2 (20°C) -7 (40°C)
Oxígeno (O ₂)	<2
Nitrógeno (N ₂)	<2
Amoníaco (NH ₃)	<1
Hidrógeno (H ₂)	<1
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	<1

Fuente: (Flores Hidalgo, 2014, pág. 19)

2.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

2.3.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL MUNDIAL

A nivel mundial se ha incrementado la generación de biogás desde el 2000. Durante el intervalo de 2000 a 2014, la producción promedio fue de 11,2%. En 2014 el biogás producido fue de 58,7 Nm³; usando un coeficiente promedio de densidad energética de 21,6 MJ/Nm³ y el total de la producción fue de 1,27 EJ. En el informe que presento la Asociación Mundial de Bioenergía en 2017 el más grande productor de biogás fue Europa con un 49,8%, siguiéndole Asia con 31,9%, América con 16,7% y 2% o menos corresponde a Oceanía y África (Kummamuru, 2014, pág. 59).

2.3.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL ECUADOR

En el Ecuador existen dos grandes proyectos que generan biogás mediante la utilización de residuos sólidos y que lo aprovechan para la generación de energía.

2.3.2.1 PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN QUITO:

En el Distrito Metropolitano de Quito la generación de basura se estima en 2000 Tn/día. Se está promoviendo un proyecto para la generación de electricidad con esta y es el "Relleno Sanitario EL Inga I y II, ubicado en Pífo una parroquia de la ciudad de Quito, el cual fue construido mediante una fusión privada-publica que se firmó en el mes de enero de 2016 (Holguín, 2017)

La obra cuenta con 2 generadores que tienen la capacidad de producir 40 MW/día los cuales conforman la primera fase. La segunda fase (marzo 2017) consto de la implementación de 3 generadores. El suministro básico de electricidad de alrededor de 20000 hogares es el objetivo principal de dicho proyecto (Godoy Zúñiga, Silva Recalde, & Palacios Fuentes, 2018, págs. 6-7). En el interior del Rellano Sanitario El



Ing funciona la planta, la cual cuenta con tuberías de HDPE³ que transportan el biogás hacia 2 generadores que constan con una potencia de 5MW/hora y una línea de transferencia de 22,8kV que trabajan bajo el ciclo de Otto (ARCONEL, 2016).

2.3.2.2 PROYECTO BIOGÁS PICHACAY, CUENCA:

EL proyecto está ubicado en la parroquia Santa Ana a 21km del cantón Cuenca el cual cuenta con 30 fosas dentro del relleno sanitario de Pichacay. El cual inicio en 2015 y consta de 2 fases:

1. Generación y Captación del metano a partir de la degradación de los desechos orgánicos.
2. Producción de energía aprovechando el biogás generado.

La profundidad de los pozos de captación es de 15m y 30m, los que transportan el fluido de desechos hacia un biodigestor que separa los componentes, elimina humedad de los mismos y los purifica hasta la generación de energía más limpia. Este proyecto se encuentra entrelazado a la Red Nacional de Energía. El mismo que tiene como propósito generar 2MW/hora de electricidad por medio de dos motores de combustión y reducir la contaminación en aproximadamente 46.000,00 toneladas de dióxido de carbono equivalente por año, además se espera generar energía eléctrica para abastecer a 7.300 familias con un consumo de 160kWh/mes (Godoy Zúñiga et al, 2018, pág. 7).

2.4 USOS DEL BIOGÁS

El biogás puede ser aplicado en diferentes campos como son a nivel doméstico, comunitario e industrial. A escala doméstica y comunitaria se emplean bioreactores de capacidad de 2 a 16 m³, principalmente para la cocción de alimentos, iluminación y calefacción. Los biodigestores que se usan a nivel doméstico o comunitario pueden ser: de tipo manga tubular o semi enterrados que así mismo pueden ser de domo fijo o flotante (Orskov et al, 2014, pág. 6). Además en zonas rurales se aplica como autoabastecimiento de energía (Surendra, Takara, Hashimoto, & Khanal, 2014, pág. 848).

También se puede usar como combustible para motores, cuyo funcionamiento lo realizan con una combustión a diésel o gasolina. En los que funcionan a diésel una vez que inician a trabajar el flujo de combustible se disminuye en la entrada a un 35%

³ Polietileno de Alta Densidad (High density polyethylene)



y se inyecta un flujo de biogás en un 65%. Esto se realiza directamente en la cámara de combustible o por medio de un purificador de aire (Padilla Sevillano & Rivero Méndez, 2016, pág. 38).

A escala industrial los bioreactores pueden ser utilizados para la generación de energía térmica o puede ser usado como combustible para medios de transporte terrestre. Para que el biogás pueda ser utilizado debe ser purificado para poder eliminar otros gases como el CO_2 e impurezas. Es muy usual el encontrar este tipo de bioreactores en rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales e industrias de alimentos y agropecuarias (Pabuena Acosta & Pasqualino, 2014, pág. 28).

Debido a que el biogás es un combustible que posee un alto valor calórico de 19,6 a 25 MJ/m^3 . De acuerdo a este potencial se puede destinar el uso de este a la generación de energía tanto a escala industrial o bien para uso doméstico como:

Generación de calor en calderas (Pretell Saman, 2017, pág. 20).

- Producción de iluminación en lámparas infrarrojas.
- Uso directo en termo tanques y refrigeradoras.
- Aplicación en quemadores (cocción de alimentos).
- Cogeneración de energía (pilas de combustibles).
- Como combustible en automóviles (modificando el motor).
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.



Ilustración 1. Esquema de los usos de biogás.

Fuente: (PRETELL SAMAN, 2017, pág. 21)

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIOGÁS

Se considera que el biogás es un biocombustible que demuestra varias ventajas y desventajas entre las que se encuentran las del tipo ambiental, social, energético y como se puede ver en la siguiente tabla (Rojas Sanchez, 2018, pág. 18).

Tabla 4. Ventajas y desventajas del biogás.

Aspecto	Ventajas	Desventajas
Ambiental	Descontaminación de los residuos. Producción de bioabono de alta calidad.	Plantea dificultad para almacenarlo y distribución.
Económico	Materia prima existente en cualquier lugar de los países.	El sistema de producción plantea altos costos.
Social	Idea para el desarrollo de proyectos energéticos.	Peligro por su capacidad de inflamarse fácilmente.
Energético	Fuente de energía renovable, uso eficiente y generación distribuida.	Produce menos energía por unidad de volumen.

Fuente: (Rojas Sanchez, 2018, pág. 18).

3. CAPÍTULO III: DIGESTIÓN ANAEROBIA

3.1 DEFINICIÓN

Se define como un proceso bioquímico que se realiza por la intervención de diferentes

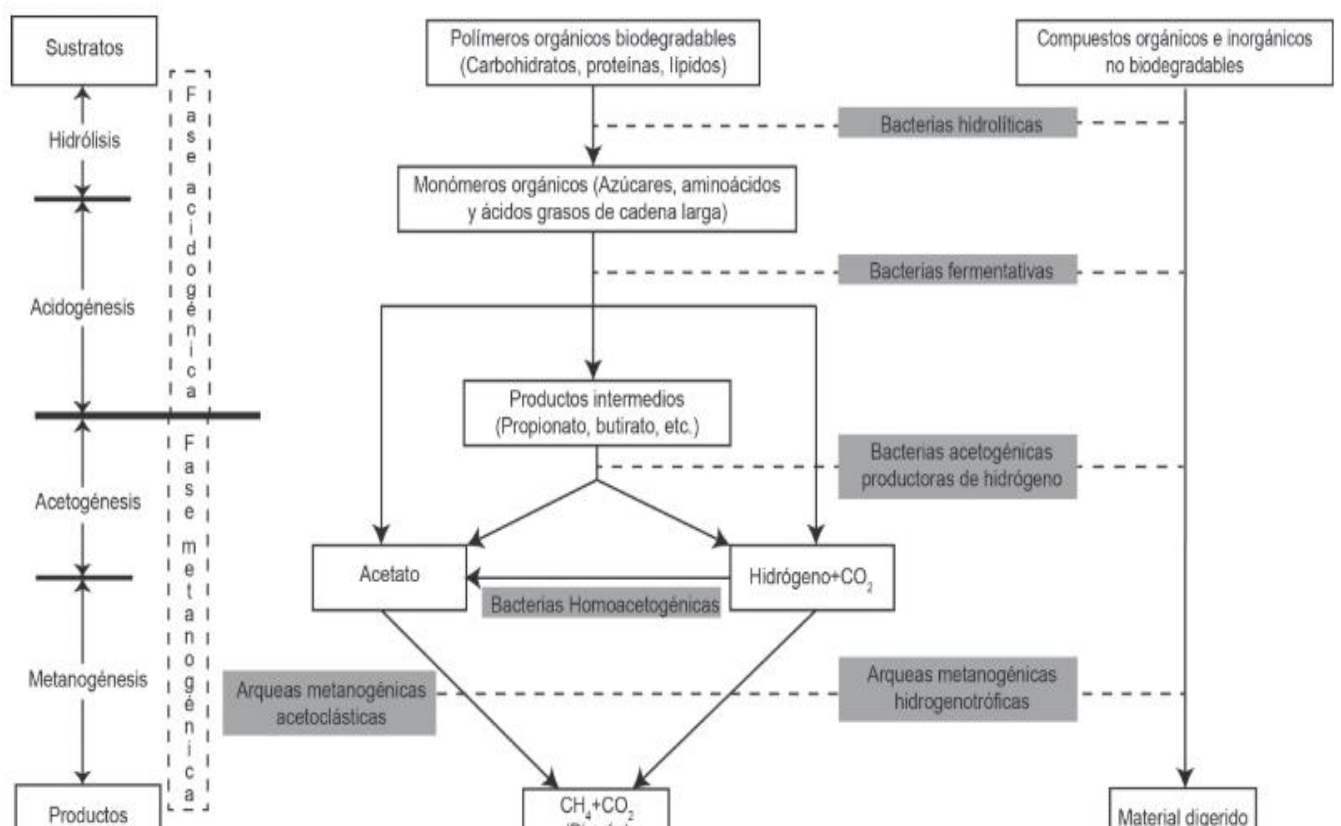


Ilustración 2. Secuencia metabólica y grupos microbianos que intervienen en la digestión anaerobia.



grupos de microorganismos que se encargan de convertir materia orgánica en ausencia de oxígeno, de moléculas complejas como: proteínas, lípidos y carbohidratos en otras más sencillas de menor peso como los aminoácidos, ácidos grasos volátiles y azúcares que son solubles en agua. El producto final es el biogás que está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 97).

Fuente: (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 97).

La digestión anaerobia se puede generar de forma natural en varios lugares como: campos de arroz, pantanos, rellenos sanitarios y también de forma artificial en biodigestores (Parra Huertas, 2015, pág. 143).

3.2 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia logra que la materia orgánica sea transformada mediante 4 etapas metabólicas, las cuales son: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. En cada una de las fases está actuando un grupo específico de microorganismos que son del tipo anaerobio facultativos los cuales generan productos intermedios en cada etapa (Arhoun, 2017, pág. 14).

3.2.1 ETAPA DE HIDRÓLISIS

Las macromoléculas que son insolubles, son hidrolizadas por enzimas de las bacterias del tipo hidrolíticas en moléculas solubles más sencillas (Arhoun, 2017, pág. 15). Esta etapa será la que limite la velocidad de generación de biogás durante la digestión anaerobia (Flores Hidalgo, 2014, pág. 22). Esta velocidad se ve afectada por diferentes factores como: pH, temperatura, tamaño y composición del sustrato (Arhoun, 2017, pág. 15).

En esta etapa se rompen los enlaces del tipo covalente por medio de una reacción química del componente del sustrato con el agua. En este caso los carbohidratos serán hidrólizados en pocas horas, las grasas y proteínas en algunos días. En cambio la lignina y la lignocelulosa sufrirán una hidrólisis lenta e incompleta.

3.2.2 ETAPA DE ACIDOGÉNESIS

En esta los productos obtenidos en la fase anterior se van a convertir en componentes orgánicos complejos y solubles, los cuales se desdoblan en ácidos de cadena corta. Es decir que en esta etapa intervienen las bacterias del tipo acidogénicas, las cuales



van a ser las encargadas de generar alimento para los microorganismos que actúen en las etapas posteriores. También se encargan de eliminar la presencia de oxígeno que pueda encontrarse en el sistema (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016, págs. 27-28).

3.2.3 ETAPA DE ACETOGÉNESIS

En esta fase los compuestos generados en la etapa anterior servirán de sustrato para los microorganismos presentes en esta fase. En esta etapa los compuestos que no son convertidos directamente en metano, son transformados en sustratos metanogénicos por las arqueas metanogénicas (Parra Huertas, 2015, pág. 145).

Durante las reacciones de oxidación anaeróbica interactúan dos grupos de microorganismos y es muy importante que estos colaboren entre sí. Esta contribución

está sujeta a la presión parcial de hidrógeno del sistema. En condiciones anaerobias, se da una producción de H_2 , debido a que los protones son utilizados como aceptores de electrones (Adekunle & Okolie, 2015, pág. 208).

Hay que tener en cuenta que dichas reacciones de oxidación solo pueden darse siempre y cuando la presión parcial de hidrógeno sea baja, por lo que se explica porque la contribución de las bacterias metanogénicas es importante, ya que estas seguirán consumiendo el H_2 para generar metano (Acarley García, 2018, pág. 15).

3.2.4 ETAPA DE METANOGÉNESIS

En la digestión anaerobia la metanogénesis es la fase final de este proceso. Las bacterias metanogénicas que son estrictamente anaeróbicas son las responsables de convertir el ácido fórmico y el acético en nuevos productos como el dióxido de carbono y el metano. Estas también a partir del dióxido de carbono y el hidrógeno pueden producir metano (Ortiz González, 2017, pág. 10).

El Hidrógeno, dióxido de carbono y el ácido acético, son convertidos a metano por dos tipos de bacterias: metanogénicas acetotróficas, las cuales toman el sustrato para generar el 70% de metano es el ácido acético, entre las cuales tenemos a Metanógenos Hidrogenotróficas y Methanosarcina Acetivorans. Los microorganismos que usan el hidrógeno y dióxido de carbono como sustrato son: Metanobrevibacter Arboriphilus o Metanobacterium Bryantii. Esta fase es la que limita el proceso de digestión anaerobia (Parra, y otros, 2015, pág. 516).

3.3 MICROBIOLOGÍA DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS

Es importante comprender las interacciones complejas de los microorganismos que se involucran en el proceso de digestión anaerobia. Esto nos sirve para poder realizar de mejor manera los procesos de control (Maspolim, Zhou, Chenghong, Xiao, & Jern, 2015, págs. 140, 54-62). Dependiendo del sustrato que se va a utilizar los microorganismos pueden clasificarse en heterótrofos y autótrofos. Los heterótrofos son los que van a utilizar la materia orgánica como fuente de carbono y energía para el desarrollo de nuevos microorganismos, por otro lado los autótrofos son los que oxidan los compuestos inorgánicos para generar energía utilizando como fuente de carbono el dióxido de carbono (Parra Huertas, 2015, págs. 145-146).

La transformación anaeróbica de los complejos orgánicos en metano y dióxido de carbono necesita de la actividad conjunta y coordinada de varios grupos tróficos de

colonias o poblaciones bacterianas. Generalmente la digestión anaerobia se ha considerado como un proceso que reconoce la existencia de tres grupos bacterianos los cuales son los siguientes: acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (Bouallagui, Touhami, Cheik, & Hadmi, 2015, págs. 3-4).

En la ilustración 3 se identifica los grupos bacterianos que intervienen en el proceso de digestión anaerobia.

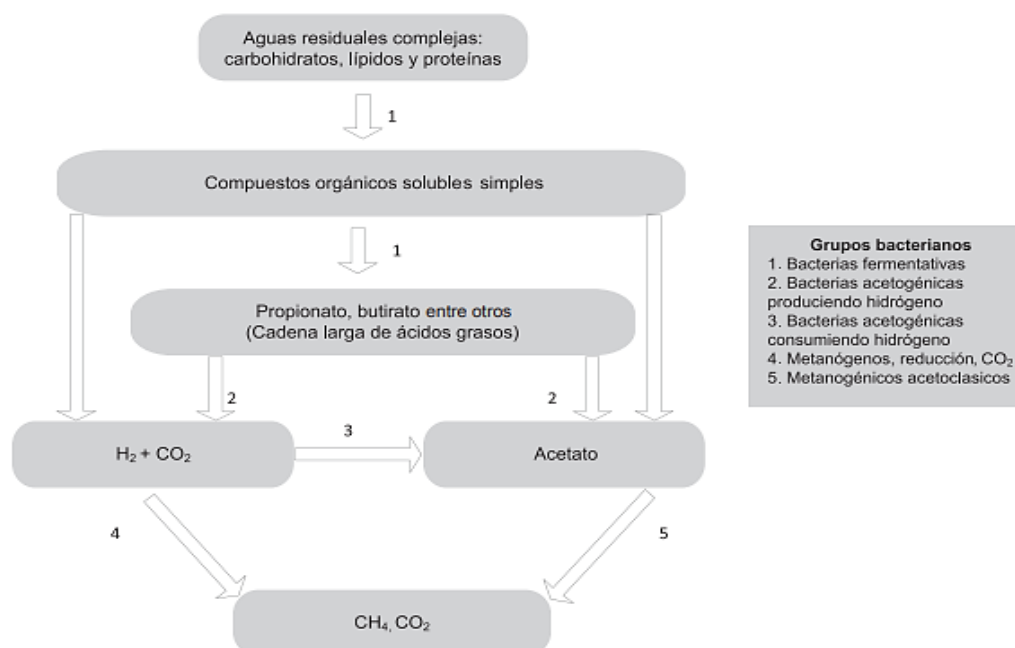


Ilustración 3. Grupos bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia.



Fuente: (BOUALLAGUI et al, 2015, págs. 3-4)

Hay que considerar que para que la digestión anaerobia tenga una estabilidad en su proceso, cada etapa tiene que cumplir su tiempo y velocidad de reacción óptima. Considerando este último parámetro se puede mencionar que la etapa Hidrolítica es la más rápida de todo el proceso, ya que las bacterias que intervienen en esta tienen un tiempo máximo para desarrollarse de 30 minutos, luego se encuentra la etapa de Acidogénesis en la cual los microorganismos presentes tardan desde 1,5 a 5 días para reproducirse y generar productos y finalmente la etapa Metanogénica es la más lenta del proceso, ya que esta depende de que las otras etapas se lleven a cabo adecuadamente. Además también se puede controlar el proceso realizando un análisis de los productos presentes en la solución del biodigestor. También se lo puede controlar mediante un monitoreo del pH, ya que en un cuando este se encuentra en un

intervalo de 7,2 a 7,4 se encuentra en una etapa Hidrolítica, cuando este está entre 7 y 7,2 se encuentra en las etapas intermedias de Acidogénesis y Acetogénesis y cuando el pH está en un valor de 6,5 y 7,5 está en la Metanogénesis (González Cabrera, 2014, págs. 27-30).

3.4 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) (PRODUCCIÓN DE BIOGÁS)

Es un ensayo que se efectúa a escala de laboratorio y se lo hace en un reactor discontinuo. El cual nos permite determinar la máxima generación de metano de diferentes sustratos, los cuales pueden ser en forma líquida o sólida. Este ensayo radica de la mezcla de un sustrato con inóculo en condiciones anaerobias y operacionales definidas. Se cuantifica el metano producido por un método específico de medición (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 98). Este ensayo presenta varias aplicaciones:

- Determinar la biodegradabilidad anaerobia y la producción máxima de metano de diferentes residuos orgánicos.
- Identificar el potencial de producción de energía de un sustrato.
- Seleccionar inóculos e identificar la adaptación o inhibición de los microorganismos.
- Determinar la cinética de degradación para la calibración de modelos matemáticos y cinéticos que permiten simular el proceso de digestión y predecir el funcionamiento de digestores a escala real.
- Evaluar el efecto de la co-digestión de diferentes sustratos.



3.5 PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN PBM

Los factores que se deben controlar en el ensayo PBM son: tipo de sustrato, inóculo, capacidad del reactor, temperatura, pH, capacidad buffer o alcalinidad, contenido de sólidos, solución de nutrientes, tiempo de retención, la relación sustrato/inóculo, relación C/N, humedad y componentes inhibidores del ensayo (Cantuña Cóndor, 2018, pág. 17).

3.5.1 SUSTRATO

Se debe caracterizar completamente el sustrato. En el cual se debe determinar los sólidos volátiles (SV), el contenido de nitrógeno, los sólidos totales, el contenido de fósforo y la demanda química de oxígeno (DQO). También se debe identificar el contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa, ya que durante el proceso de digestión anaerobia, la lignina no se degrada (Acarley García, 2018, págs. 29-30).

3.5.2 INÓCULO

En el proceso de digestión anaerobia es muy importante tanto la calidad como la cantidad del inóculo, se recomienda utilizar inóculos frescos o activos, esto con el fin de disminuir el tiempo de adaptación del inóculo en el sustrato. (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 99).

El inóculo puede ser conseguido de algún biodigestor activo a base de estiércol, esto con el objetivo de poder tener la máxima concentración de microorganismos. Para así poder evitar alguna limitación en el momento de usar varios sustratos (Cantuña Cóndor, 2018, págs. 22-23).

Hay que considerar que el inóculo debe ser homogéneo y que todo material extraño que no sea parte de la biomasa se debe retirar del sistema. Además los inóculos del tipo mesofílicos o termofónicos se pueden emplear para el proceso considerando la temperatura a la que se lleve a cabo la digestión (Acarley García, 2018, pág. 30).

Generalmente al inóculo se lo caracteriza a través de algunos parámetros fisicoquímicos que nos muestren el contenido de biomasa que se encuentra activa en él. Así como la capacidad de generar metano (Cárdenas Cleves et al, 2016, págs. 99-100).

3.5.2.1 ESTIÉRCOL COMO INÓCULO

En general el estiércol es la materia fecal de los animales, cuya función consiste en aportar una gran diversidad de microorganismos tales como levaduras, hongos,

protozoos, y bacterias los cuales dan inicio al proceso de fermentación. Una característica importante del estiércol es que sus microorganismos pueden desarrollarse en medios aerobios y anaerobios (Gualoto Tituaña, 2018, pág. 16).

3.5.2.1.1 ESTIÉRCOL BOVINO

El estiércol está constituido por los excrementos de los animales, que resultan como desechos del proceso de digestión de los animales que éstos consumen. Para muchos agricultores aferrados a viejos principios, el estiércol es el mejor de los abonos, superior a cualquier otro, también es utilizado como inóculo en procesos tecnológicos para generar biogás (Macedo Linarez, 2015). En la tabla N°5 se puede observar la composición del estiércol vacuno

Tabla 5. Composición del Estiércol del ganado vacuno.

Fuente	Tipo	Sustancia Orgánica	N%	P ₂ O ₅ %	K ₂ O%
Bovino	Líquido	5	1,0	0,1	1,6
Bovino	Sólido	8	0,4	0,2	0,1
Bovino	Mezcla	10	0,6	0,2	0,1

Fuente: (Macedo Linarez, 2015, pág. 17)

3.5.2.1.2 ESTIÉRCOL PORCINO

Este tiene una consistencia líquida, además contiene elevados contenidos de cobre y zinc, esto es debido al tipo de alimentación del animal. El estiércol porcino es usado como abono para cultivos, el cual al estar demasiado tiempo almacenado genera gases que producen malos olores como son: metano, amoníaco, dióxido de carbono (Cantuña Cóndor, 2018, pág. 23).

3.5.2.1.3 COMPOSICIÓN DEL ESTIÉRCOL

La composición del estiércol puede variar de acuerdo a la alimentación del animal, en este caso al ser animales herbívoros, su dieta va a ser de pastos por lo que sus excrementos se van a componer principalmente de agua y fibra (Arellano, Cruz Rosales, & Huerta, 2014, págs. 5-6). Además los animales también son alimentados con sal en grano, balanceado, melaza, etc., hacen que este estiércol se convierta en fuente de nitrógeno y carbono permitiendo el desarrollo de las bacterias metanogénicas (Cantuña Cóndor, 2018, pág. 23).

NUTRIENTE	Vacunos 	Porcinos 	Caprinos 	Conejos 	Humanos 	Gallinas 
Materia orgánica	48.90	45.30	52.80	63.90	88 - 97	54.10
Nitrógeno total	1.27	1.36	1.55	1.94	5 - 7	2.38
Fósforo asimilable (P_2O_5)	0.81	1.98	2.92	1.82	3 - 5.4	3.86
Potasio (K_2O)	0.84	0.66	0.74	0.95	1 - 2.5	1.39
Calcio (CaO)	2.03	2.72	3.20	2.36	4 - 5	3.63
Magnesio (MgO)	0.51	0.65	0.57	0.45	2 - 3	0.77

Ilustración 4. Contenido de materia orgánica y algunos micronutrientes en función del porcentaje de materia seca de diferentes animales domésticos y el humano.

Fuente: (Cantuña Cóndor, 2018, pág. 23).

3.5.3 CAPACIDAD DEL REACTOR

Este ensayo se puede realizar en reactores discontinuos en los cuales los volúmenes pueden variar desde 100ml hasta 2L. El volumen en el cual se encuentran interactuando las 2 fases se considera el útil y el que queda libre se lo denomina espacio de cabeza en el cual se acumularan los gases generados (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 100).

3.5.4 TEMPERATURA

En muchos procesos en los que ocurren reacciones bioquímicas, la eficiencia de la digestión anaerobia incrementa mediante la temperatura aumenta. El proceso de metanogénesis puede generarse en tres diferentes intervalos de temperatura donde se desarrollan los microorganismos psicrófilos de 15°C a 24°C, los mesófilos de 35°C a 37°C y los termófilos de 50°C a 60°C. Se debe tener en cuenta que para tener un buen funcionamiento durante el proceso de biodigestión la temperatura debe permanecer constante, ya que la variación en la misma pueden disminuir la producción de biogás (Arhoun, 2017, pág. 17).

La temperatura influye directamente en la primera fase que es la hidrólisis, ya que en condiciones termofílicas esta presenta una ventaja en cuanto que mejora la velocidad metabólica, una menor producción de productos indeseados y en la destrucción de microorganismos que afectan en la producción de biogás (Arhoun, 2017, pág. 17).



3.5.5 pH Y ALCALINIDAD

El rango óptimo de pH en el cual puede desarrollarse el proceso debe ser cercano a la neutralidad, entre 6,5 y 7,5 para garantizar que las arqueas metanogénicas tengan actividad metabólica. También nos ayuda a mantener a los ácidos grasos en estado no tóxico. Cuando el pH baja se produce que los ácidos grasos volátiles (AGV) alcancen su estado tóxico, lo que provoca que se genere cantidades limitadas de metano en el biogás, lo que también disminuye su eficiencia energética (Cantuña Cóndor, 2018, pág. 19).

La capacidad buffer se mide a través de la alcalinidad, la cual varía de acuerdo al pH del medio. La misma que se efectúa en un rango de 6 a 8, en el cual el bicarbonato - dióxido de carbono controla la misma en un equilibrio químico. La relación entre la alcalinidad intermedia que es generada por los AGV y la parcial que se produce por el bicarbonato, nos da la relación total de la alcalinidad. El valor de la relación no debe

sobrepasar de 0,3-0,4; esto con el fin de evitar que se produzca acidificación en el reactor (Científicas, 2013, págs. 1-3).

3.5.6 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA

Se le conoce como el tiempo en el que el sustrato permanece en el reactor discontinuo. El cual se define como el tiempo que se necesita para que disminuyan los sólidos volátiles del sustrato, el cual va a depender de dos factores: biodegradabilidad del sustrato y la temperatura de la reacción. Lo que quiere decir que mientras más elevada la temperatura sea menor va a ser este tiempo y con lo que va a aumentar la velocidad de digestión anaerobia consiguiendo una mejor generación de biogás (Belduma Zambrano, 2015).

3.5.7 CONTENIDO DE SÓLIDOS TOTALES (ST)

La movilidad de los microorganismos metanogénicos se ve afectada debido al incremento de los sólidos totales en la solución en la cual se lleva a cabo la reacción. Como respuesta de esto se puede obtener bajos rendimientos en la generación de biogás. Para reactores de tipo discontinuo el porcentaje de ST se encuentra entre un 40 a 60 %, estos valores son adecuados y aseguran que se genere de una mejor manera el proceso (Científicas, 2013, págs. 8-9).

3.5.8 INHIBIDORES

Algunos compuestos generan inhibición en el proceso de biodigestión debido a la toxicidad que causan en el sistema. Estos pueden estar presentes ya sea en la materia orgánica que ingresa al digestor o como subproducto de las fases metabólicas de transformación bioquímica y pueden inducir la disminución en la generación de biogás y pueden incluso generar la falla total del ensayo (Cantuña Cóndor, 2018, págs. 19-20).

- **Amoníaco:** Es producido en el proceso de degradación de las proteínas y otros sustratos que tengan en su composición nitrógeno y generalmente se encuentra en la forma amoníaco libre y como ion amonio. Es un nutriente esencial para el desarrollo de los microorganismos, pero en altas concentraciones se vuelve tóxico. También este puede neutralizar los AGV y ayuda en la capacidad buffer del proceso. Los microorganismos metanógenos acetoclásticos, que transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono son muy sensibles a las elevadas concentraciones de amonio. La concentración de amoníaco libre aumenta con el pH y temperatura. Para situaciones de pH 7 y 35°C, por debajo de 1% del amoníaco total se encuentra como amoníaco libre. No obstante a la misma temperatura pero a un pH de 8 el amoníaco libre aumenta en un 10% (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014, págs. 383-392).
- **Sulfuro de Hidrógeno:** Este cuando se encuentra disuelto actúa como citotoxina y este puede impedir el proceso de biodegradación, en concentraciones muy bajas de 50mg/L. Un probable recurso para disminuir la concentración de H₂S es hacer precipitarlo como sulfuros (S²⁻) reaccionando con iones de hierro o con otros metales pesados. No obstante el azufre es considerado un macronutriente muy importante (Acarley García, 2018, pág. 23).
- **Iones metálicos ligeros y metales pesados:** Estos incluyen: potasio, calcio, sodio y magnesio, que se encuentren en la solución de los biodigestores anaerobios. Estos son importantes para el desarrollo microbiano, aunque esto va a depender de la concentración en la que se encuentren, ya que a concentraciones bajas pueden estimular el crecimiento de los microorganismos, pero por el contrario a altas concentraciones pueden ser tóxicos y pueden inhibir el crecimiento de los mismos. En la siguiente tabla se



pueden observar las concentraciones críticas para el desarrollo del proceso (Arhoun, 2017, pág. 24).

Tabla 6. Concentraciones críticas de varios inhibidores.

Sustancia	Concentración estimulante (mg/l)	Concentración de inhibición moderada (mg/l)	Concentración de inhibición alta (mg/l)
Na ⁺	-	3500-5500	8000
K ⁺	200-400	2500-4500	12000
Ca ²⁺	100-200	2500-4000	8000
Mg ²⁺	75-150	1000-1500	3000

Fuente: (Arhoun, 2017, pág. 24).

Por otro lado algunos de los metales pesados que se encuentran en pequeñísimas concentraciones (Zn, Cr, Ni, Cd, etc.) sirven como activadores que ayudan a la actividad enzimática de la población microbiana del ensayo PBM, a elevadas o moderadas concentradas pueden generar toxicidad en los biodigestores (Arhoun, 2017, pág. 24).

3.5.9 SOLUCIÓN DE NUTRIENTES

En la literatura no se encuentra un acuerdo debido a la solución de nutrientes que se debe usar en el ensayo PBM, por otro lado existen experiencias internacionales y nacionales que recomiendan adicionarla en el reactor. En general la misma se encuentra constituida por micro y macronutrientes y algunos otros compuestos como las vitaminas, que son requeridos por las bacterias anaerobias, también se puede agregar sustancias como agentes reductores, esto con el objetivo de garantizar las condiciones anaerobias en el reactor. En la siguiente tabla se puede observar la solución de nutrientes que se recomienda para el ensayo PBM (Prabhudessai, Ganguly, & Mutnuri, 2013, págs. 4-5).

Tabla 7. Composición de la solución de nutrientes recomendada para el ensayo.

Solución	Compuesto	Unidades	Concentración
Macronutrientes	NH ₄ Cl	gl ⁻¹	170
	KH ₂ PO ₄	gl ⁻¹	37
	MgSO ₄ ·4H ₂ O	gl ⁻¹	9
Micronutrientes	CaCl ₂ ·2H ₂ O	gl ⁻¹	8
	NaHCO ₃	mg l ⁻¹	1000
	FeCl ₃ ·6H ₂ O	mg l ⁻¹	2000

	ZnCl ₂	mg l ⁻¹	50
	CuCl ₂ .2H ₂ O	mg l ⁻¹	30
	MnCl ₂ .4 H ₂ O	mg l ⁻¹	500
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4 H ₂ O	mg l ⁻¹	90
	AlCl ₃ .6 H ₂ O	mg l ⁻¹	50
	CoCl ₂ .6 H ₂ O	mg l ⁻¹	2000
	NiCl ₂ .6 H ₂ O	mg l ⁻¹	50
	H ₃ BO ₃	mg l ⁻¹	50
	Na ₂ SeO ₃ .5 H ₂ O	mg l ⁻¹	100
	EDTA	mg l ⁻¹	1000
	HCl 36%	ml l ⁻¹	1
	Agente reductor Na ₂ SO ₃ .7H ₂ O	gl ⁻¹	100
Otros	Indicador de Potencial Redox (Resarzurina)	gl ⁻¹	0,5
	Extracto de levadura (Fuente de vitaminas)	gl ⁻¹	0,2

Fuente: (Prabhudessai et al, 2013, págs. 4-5)

3.5.10 RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO C/N

Cuando se somete a un proceso de digestión anaerobia a las metanobacterias estas son capaces de producir biogás cuando su concentración supera los valores óptimos de concentración. Las principales fuentes de cuales se alimentan estas son: el carbono, el cual se convierte en la fuente de energía y por otro lado el nitrógeno es

importante para la generación nuevas bacterias. La relación que existe entre C/N óptima para que se dé la biodigestión oscila entre 20 a 30, no obstante si esta relación es alta la cantidad de nitrógeno será pequeña y no reaccionara con la materia ya que esta será agotada por las metanobacterias para formar proteínas, por lo tanto la generación de gas será elevada. Y por el contrario si esta relación es baja, es decir que el nitrógeno se va a encontrar en grandes cantidades y se liberara en forma de amoníaco (Belduma Zambrano, 2015, pág. 25).

3.5.11 RELACIÓN SUSTRATO/INÓCULO

La relación entre el sustrato y el inóculo (S/I) es expresada en términos de la cantidad de sólidos volátiles (SV) y en varios procesos a la demanda química de oxígeno (DQO). Se tiene que considerar la capacidad buffer y la producción potencial de ácidos grasos volátiles para poder obtener una relación óptima entre estos. No obstante es importante que para ensayos en reactores tipos batch se utilice una relación S/I en la cual el contenido de SV del inóculo debe ser al menos el doble del contenido de SV del sustrato, esto con el fin de evitar la inhibición (Julio Guerrero, 2016, pág. 6).



3.5.12 Humedad

Para que se facilite la digestión anaerobia, es necesario un alto contenido de agua. La cual puede afectar en el rendimiento del ensayo por que la materia orgánica se puede diluir fácilmente. Se ha estudiado que en concentraciones de 60 a 80 % de humedad se puede obtener las tasas más altas de producción. Las partículas sólidas pueden sedimentar en el reactor si el material se encuentra muy diluido y estas no van a poder ser degradadas correctamente. La agitación se dificulta, si la suspensión es muy densa y puede impedir la salida de los gases (Serrano, Siles, Chica, & Martín, 2013, págs. 125-132).

3.6 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS (METANO).

Los métodos de cuantificación de los gases producidos en la digestión anaerobia pueden ser volumétricos o manométricos. En este tipo de ensayos es importante que se mida la concentración de dichos gases (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 102).

3.6.1 MÉTODOS MANOMÉTRICOS

En este tipo de métodos de cuantificación se utiliza un equipo llamado Oxitop®, el cual es el más utilizado, este nos ayuda a medir la presión ejercida por el biogás que está compuesto por metano y dióxido de carbono, el cual actúa sobre un sensor a través de cristales de NaOH, el equipo puede hacer una captura mediante absorción del CO₂ y

la diferencia de presión nos dará la medida de metano que se ha generado en el biogás (Cantuña Córdor, 2018, pág. 25).

3.6.2 MÉTODOS VOLUMÉTRICOS

Estos métodos consisten en la cuantificación del volumen que se desplaza por la generación de biogás o metano que se generan en el digestor, el cual contiene tanto al inóculo como al sustrato. Existen tres métodos por los cuales medir el contenido de metano en el biogás (Cantuña Córdor, 2018, pág. 25).

- Medición de volumen: Este método consiste en medir el volumen de biogás, se hace fluir por un frasco (contenedor) con una solución de NaOH o KOH para remover el CO₂ y hacerlo precipitar, con esto podemos medir el metano (López Martinez, 2013, págs. 9-10).
- Cromatografía de gases: Se usan unas sustancias propias que sirven para separar el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y metano, con lo cual nos da la cantidad de metano en el biogás (López Martinez, 2013, pág. 10).

- Medición in situ: Este método se lo realiza con un equipo portátil, el cual nos va a dar el porcentaje de metano, este dispositivo también nos va a permitir determinar el contenido de dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, óxidos nitrosos dióxido de azufre, la presión diferencial del gas, el exceso de aire y el rendimiento (López Martínez, 2013, págs. 11-12).



Ilustración 5. Método manométrico (Equipo OxiTop®).
Fuente: (López Martínez, 2013, págs. 11-12)

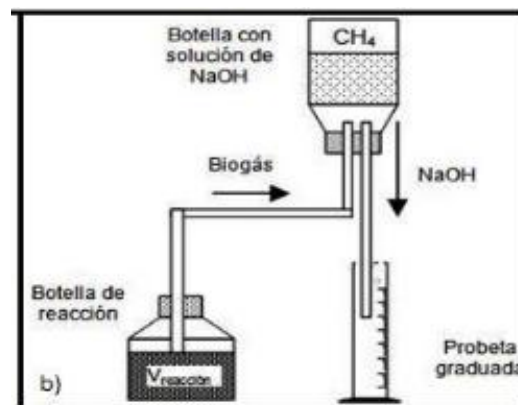


Ilustración 6. Esquema del montaje experimental del método volumétrico.
Fuente: (López Martínez, 2013, págs. 9-10).



4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

Para la investigación propuesta de generación de biogás se partió de un hidrólizado tipo de cascarilla de arroz, el cual fue facilitado gracias al grupo de Biomasa, Bioenergía Y Gestión Energética del departamento de Química Aplicada y Sistemas de Producción, que viene realizando estudios en la hidrólisis de la cascarilla de arroz, la composición del mismo se puede observar en la tabla 8, mientras que como inóculo se utilizaron dos tipos de excrementos como son de vaca y cerdo.

Tabla 8. Composición del Hidrólizado de cascarilla de Arroz.

Solución	°Brix	Volumen (ml)	Cantidad de ART (g/100g)	Cantidad de Furfural (mg/100g Biomasa)	Cantidad de HidroximetilFurfural (mg/100g de Biomasa)
Hidrólizado de Cascarilla de Arroz	22	300	22,15	1,53	6,44



Fuente: Grupo de Biomas, Bioenergía y Gestión Energética del departamento de Química Aplicada y Sistemas de Producción de la Universidad de Cuenca.

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización de los experimentos se utilizó el diseño experimental del tipo factorial 2^K . Se realizaron dos experimentos manteniendo constante la cantidad de sustrato y la concentración de °Brix y variando los factores de operación como: temperatura, oligoelementos, cantidad y tipo inóculo.

El sustrato fue seleccionado a partir de varios hidrólizados de cascarilla de arroz que se realizaron previamente, obteniendo el hidrólizado con mejor contenido de ART⁴ con una concentración de 22°Brix para ser utilizado como sustrato para la generación de biogás.

4.2 RECOLECCIÓN DEL INÓCULO (ESTIÉRCOL DE VACA)

Se recomienda utilizar inóculos frescos o activos, esto con el fin de disminuir el tiempo de adaptación del inóculo en el sustrato. (Cárdenas Cleves et al, 2016, pág. 99).

La muestra de estiércol fue recolectada un día antes de la realización del ensayo. Para esto se procedió a visitar la granja de la “Universidad Politécnica Salesiana” ubicada en el cantón Paute en las calles Av. Transversal Austral y la Av. Marginal. Una vez

localizada la granja y el lugar donde se encuentran los bovinos, se recolecta la muestra en el sector en el cual se encuentran los excrementos vacunos, de los cuales se tomó una submuestra utilizando una pala previamente esterilizada. Es importante el tomar la parte fresca del excremento del animal. La cual se colocó en un balde grande plástico para su transporte, luego se debe mezclar las submuestras para obtener una muestra homogénea y al final se la coloca en una funda plástica sellada lo más herméticamente posible para evitar el ingreso de oxígeno y así evitar la degradación del excremento. La bolsa plástica se debe colocar en refrigeración a 4°C hasta el momento de su utilización.

⁴ Azúcares Reductores Totales

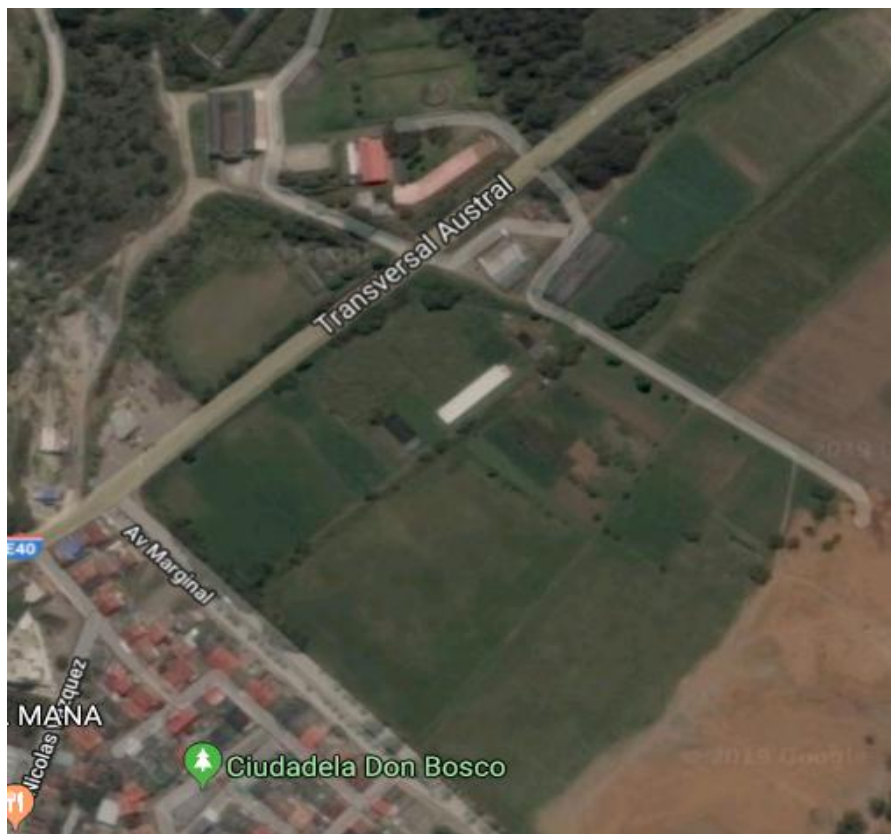


Ilustración 7. Mapa donde se encuentra ubicada la Granja de la Universidad Politécnica Salesiana.

4.4 RECOLECCIÓN DEL INÓCULO (ESTIÉRCOL DE CERDO)

La muestra del estiércol de cerdo fue recolectada un día previo a la realización del ensayo. Para lo cual se visitó una hacienda ubicada en la parroquia rural de Nulti de la ciudad de Cuenca, la cual tiene 4 cuartos destinados para la crianza de cerdos en los cuales se encuentran los desperdicios, de los cuales se tomó una submuestra utilizando una pala previamente esterilizada. Es importante el tomar la parte fresca del excremento del animal. La cual se colocó en una bolsa plástica hermética, tratando de evitar que ingrese aire a la misma y esta se colocó en un balde grande de plástico para su transporte. Al finalizar la recolección del estiércol se debe proceder a mezclar todas las submuestras para obtener una muestra homogénea, la cual se debe guardar así mismo en una bolsa hermética evitando el ingreso del aire, y se la colocó en refrigeración a 4°C hasta que sea utilizada.

4.5 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART CON INÓCULO DE EXCREMENTO DE VACA

Para el primer experimento se utilizó 300ml de sustrato de ART de hidrólizados de cascarilla de arroz el cual tiene 22°Brix. Para este experimento se usó nueve (9)



biodigestores de vidrio de 500ml de capacidad, utilizando como inóculo excremento de vaca con una concentración desde 2g/l hasta 8g/l, la temperatura de operación se varió desde 29°C a 37°C, mientras que la concentración de oligoelementos se incrementó desde 0g/l a 2g/l, la combinación de las variables para cada subexperimento se muestran en la tabla 8.

Se varió la concentración del inóculo para poder determinar cuánto influye la cantidad de inóculo en la generación de biogás. La concentración de oligoelementos se varió para poder contrastar con lo marcado en la literatura en la que menciona que la adición de uno o varios nutrientes aumentan la generación de biogás. Finalmente se trabajó con un rango de temperatura para establecer la influencia de la misma en el desarrollo de los microorganismos mesófilos.

Tabla 9. Experimento 1 generación de biogás con excremento de vaca.

Descripción de variables	Subexperimentos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Volumen de Hidrólizado (ml)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Inóculo de vaca (g/l)	8	2	5	8	2	8	2	2	8
Temperatura (°C)	37	37	33	37	37	29	29	29	29
Oligoelementos (g/l)	0	2	1	2	0	0	2	0	2

Elaborado por: Autor

Para realizar los experimentos, se procedió de la siguiente manera: se colocó 300 ml de ART de hidrólizado de cascarilla de arroz en cada erlenmeyer de 500ml, luego se colocó la cantidad de inóculo pesada para cada ensayo desde el 1 hasta el 9, así mismo se adicionó una cantidad pesada de sulfato de amonio como oligoelemento y se puso un tapón de caucho que tenía dos orificios: en el primer orificio se insertó un termómetro de alcohol con una escala hasta 110°C para medir la temperatura interna del biorreactor. Y en el segundo orificio se ingresó una manguera para la salida del biogás generado, la misma que se conecta con un frasco de color ámbar, el mismo se encuentra colgado de forma invertida con un tapón de caucho con dos vías.

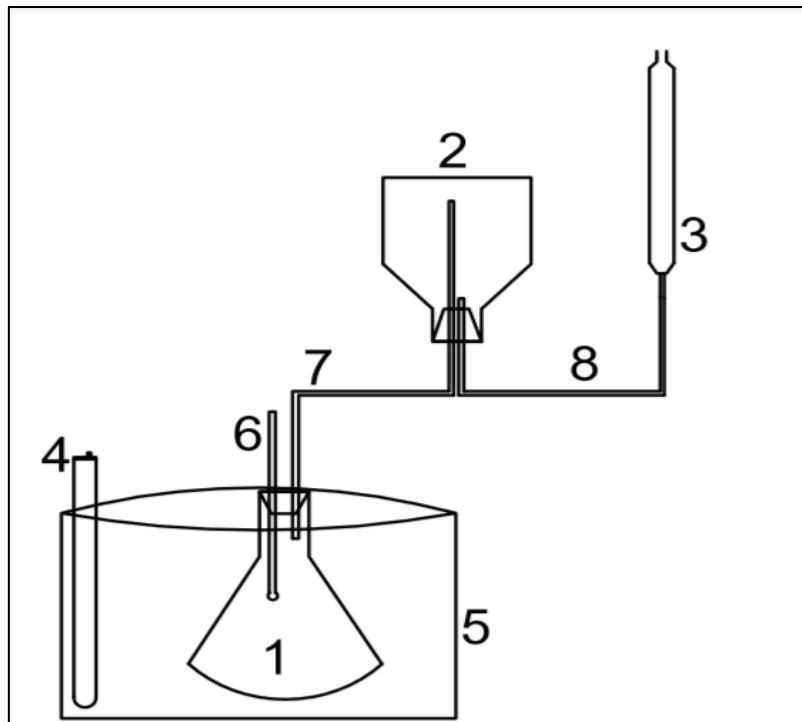


Ilustración 8. Esquema del método volumétrico utilizado.

Fuente: Realizado por el Autor, en el software de dibujo Autodesk AutoCAD 2019.

Tabla 10. Descripción del esquema del método volumétrico empleado.

Número	Descripción
1	Erlenmeyer
2	Botella de color ámbar
3	Pipeta volumétrica
4	Calentador de agua
5	Balde (tina) plástico
6	Termómetro de alcohol de 110°C
7	Manguera para la salida de biogás
8	Manguera para la salida de la solución de KOH al 5%

Elaborado por: Autor

En el interior del frasco de color ámbar se puso una solución de KOH al 5%, la cual va a reaccionar con el CO_2 del biogás que proviene del erlenmeyer. Como se mencionó el frasco presenta dos vías: la primera será la entrada del biogás generado en el biorreactor hacia el frasco y la segunda vía será la salida para la solución de KOH desplazada y mezclada con los precipitados del CO_2 que se generen, la cual estará conectada a una pipeta graduada de 50ml de volumen.

El tiempo de retención de la mezcla de hidrólizado de cascarilla de arroz, inóculo y oligoelementos será de 20 días en los cuales se ira cuantificando diariamente el



volumen desplazado en la pipeta volumétrica. Estos valores servirán para aplicar en la ecuación modificada de Gompertz.

$$B_t = B_0 \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_{max}^e}{B_0}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (1)$$

Ecuación 1. Ecuación modificada de Gompertz.

Donde:

B_t = Producción acumulada de biogás/metano [ml] en un tiempo t.

t= Tiempo de incubación [día].

B_0 =Producción acumulada máxima de biogás/metano [ml].

R_{max} =Tasa de producción máxima o velocidad de producción máxima de biogás [ml/día].

λ =Tiempo de la fase de latencia para comenzar la evolución de biogás [día].

e= Constante de Euler (2,71828).

Los parámetros cinéticos (B_0 , R_{max} , λ) fueron determinados utilizando los resultados de cada experimento que se realizó. En cuanto a la determinación del tiempo de la fase de latencia, se lo hizo mediante un control visual en la cuantificación de biogás generado tomando como el valor de λ el tiempo en días en el que se desplazó el volumen de la solución de KOH al 5% en la pipeta graduada.

4.6 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARRILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE CERDO

Para la realización del experimento que usa como inóculo el excremento de cerdo se sigue la misma metodología y materiales que se utilizó con el excremento de vaca en el primer experimento.

La combinación de variables se encuentra en la siguiente tabla al igual que en el experimento 1 se mantienen las mismas variables, a excepción del tipo de inóculo.

Tabla 11. Experimento 2 Generación de Biogás con excremento de cerdo.

Descripción de variables	Subexperimentos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9



Volumen del Hidrólizado (ml)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Inóculo (excremento de vaca) (g/l)	2	2	2	8	2	8	5	8	8
Temperatura (°C)	37	29	29	37	37	29	33	37	29
Oligoelementos (g/l)	0	0	2	0	2	2	1	2	0

Elaborado por: Autor

La cuantificación de biogás generado mediante estas condiciones se lo realiza a través de la ecuación 1 al igual que en el experimento 1.

4.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACION ENTRE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACION DE BIOGÁS

El análisis estadístico de las variables que se encuentran relacionadas en la generación de biogás se lo realizó mediante la utilización del Software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVII.

El diseño experimental que se utilizó para realizar el análisis estadístico es un diseño de cribado factorial del tipo 2^3 , con 8 Subexperimentos y un punto central, por tanto se realizaron 9 corridas con las siguientes características:

Diseño Base

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 9, incluyendo 1 punto central por bloque
- Grados de libertad para el error: 2
- Aleatorizar: Sí

Tabla 12. Variables para el análisis estadístico.

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Inóculo	2,0	8,0	g/l	Sí
Temperatura	29,0	37,0	°C	Sí
Oligoelementos	0,0	2,0	g/l	Sí

Elaborado por: Autor

Tabla 13. Variable de Respuesta del análisis estadístico.

Respuestas	Unidades
Biogás	ml

Elaborado por: Autor



4.8 MATERIALES Y REACTIVOS UTILIZADOS PARA EMPLEAR EL SISTEMA DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BIOGÁS

4.8.1 MATERIALES

Tabla 14. Materiales utilizados para el sistema de generación y cuantificación de biogás.

Descripción	Cantidad
Pipeta graduada de 50 ml	9
Erlenmeyer de 500 ml	9
Termómetros de alcohol	9
Baldes plásticos grandes	9
Calentadores de agua de pecera	9
Extensión eléctrica 3m	1
Regleta eléctrica	2
Bridas plásticas grandes	18
Bridas plásticas pequeñas	18
Corchos grandes de caucho	9
Corchos pequeños de caucho	9
Mangueras flexibles de 60cm de largo	18
Tubos de metal de 8cm de diámetro	18
Frascos de color ámbar de 500ml	9
Equipo de venoclisis	9

Elaborado por: Autor

4.8.2 REACTIVOS

Tabla 15. Reactivos.

Descripción	Cantidad
Azúcares Reductores Totales de Hidrólizado de cascarilla de arroz	5,4l
Sulfato de amonio	100g
Excremento de cerdo	100g
Excremento de vaca	100g
Agua destilada	3l
KOH al 5%	3l

Elaborado por: Autor

4.8.3 SISTEMA ARMADO DE GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS

Con los materiales ilustrados anteriormente se realizó el montaje del sistema de generación, en el cual el erlenmeyer es el biorreactor, y luego se colocó un termómetro y una manguera flexible en el corcho que va en el erlenmeyer. La manguera es la salida del biogás hacia el frasco de color ámbar de 500ml colocado de manera invertida, en su interior se encuentra 300ml de la solución de KOH al 5%. También se colocó un corcho con dos mangueras, una para la entrada de del biogás y otra para la salida de la solución de KOH con los precipitados del dióxido de carbono hacia la pipeta graduada de 50ml.



Ilustración 9. Sistema de generación y cuantificación Biogás

Elaborado por: Autor

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

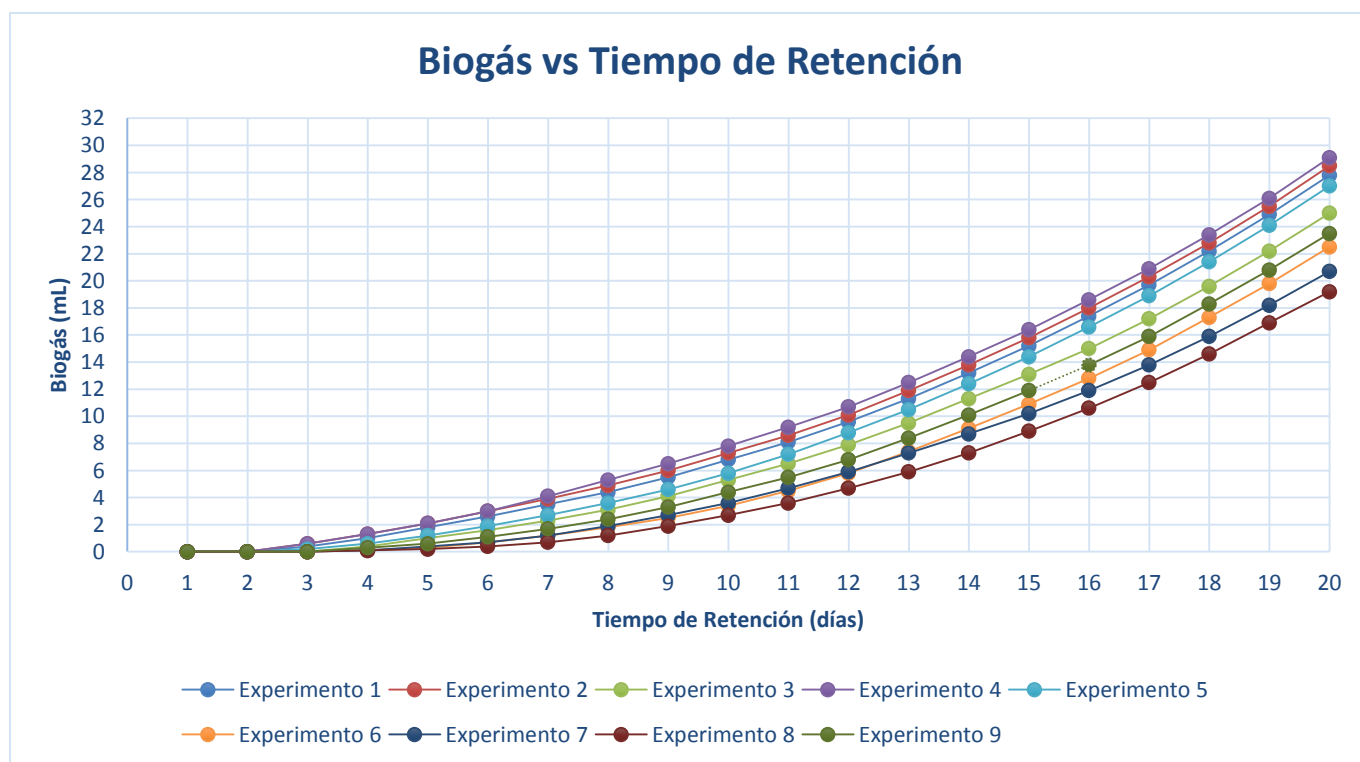
5.1 RESULTADOS

5.1.1 GENERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE VACA

La generación de biogás se realizó siguiendo la metodología explicada en el capítulo anterior. En la siguiente tabla se puede observar los valores acumulados de los distintos Subexperimentos que se realizó durante el primer ensayo que tuvo un tiempo de duración de 20 días.

En el gráfico tiempo de retención hidráulica que es el gráfico 1, se puede observar la tendencia que presenta cada subexperimento en cuanto a la relación entre la generación de biogás y el tiempo de retención.

Gráfico. 1. Generación Acumulada de Biogás a partir de Azúcares Reductores Totales de Hidrólizados de cascarilla de arroz con inóculo de vaca.



Elaborado por: Autor



Tabla 16. Generación Acumulada de Biogás (ml) a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de vaca.

Tiempo (días)	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,4	0,6	0	0,6	0,2	0	0	0	0
4	1	1,3	0,4	1,3	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3
5	1,8	2,1	1	2,1	1,2	0,3	0,4	0,2	0,6
6	2,6	3	1,6	3	1,9	0,7	0,7	0,4	1,1
7	3,5	3,9	2,3	4,1	2,7	1,2	1,2	0,7	1,7
8	4,4	4,9	3,1	5,3	3,6	1,8	1,9	1,2	2,4
9	5,5	6	4,1	6,5	4,6	2,5	2,7	1,9	3,3
10	6,8	7,3	5,3	7,8	5,8	3,4	3,6	2,7	4,4
11	8,1	8,6	6,5	9,2	7,2	4,5	4,7	3,6	5,5
12	9,6	10,1	7,9	10,7	8,8	5,8	5,9	4,7	6,8
13	11,3	11,9	9,5	12,5	10,5	7,4	7,3	5,9	8,4
14	13,2	13,8	11,3	14,4	12,4	9,1	8,7	7,3	10,1
15	15,2	15,8	13,1	16,4	14,4	10,9	10,2	8,9	11,9
16	17,4	18	15	18,6	16,6	12,8	11,9	10,6	13,8
17	19,7	20,3	17,2	20,9	18,9	14,9	13,8	12,5	15,9
18	22,2	22,8	19,6	23,4	21,4	17,3	15,9	14,6	18,3
19	24,9	25,5	22,2	26,1	24,1	19,8	18,2	16,9	20,8
20	27,8	28,5	25	29,1	27	22,5	20,7	19,2	23,5

Elaborado por: Autor



5.1.1.1 CÁLCULO DE BIOGÁS EN UN TIEMPO DE 20 DÍAS UTILIZANDO LA ECUACIÓN MODIFICADA DE GOMPERTZ PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA.

Se realizó el cálculo de la cantidad de biogás en ml que se podría generar con tiempo de retención del experimento por 20 días, para esto se utilizó la ecuación 1 que es la ecuación modificada de Gompertz y se procedió a reemplazar los resultados obtenidos en la ecuación 1 para cada subexperimento como se ve a continuación:

Para el primer subexperimento:

$$B_t = 27,8 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,39}{27,8} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 50,32 \text{ ml}$$

Para el segundo subexperimento:

$$B_t = 28,5 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,43}{28,5} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 51,59 \text{ ml}$$

Para el tercer subexperimento:

$$B_t = 29,1 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,46}{29,1} (3 - 20) + 1 \right] \right\} = 44,32 \text{ ml}$$

Para el cuarto subexperimento:

$$B_t = 25 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,25}{25} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 52,68 \text{ ml}$$

Para el quinto subexperimento:

$$B_t = 27 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,35}{27} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 48,88 \text{ ml}$$

Para el sexto subexperimento:

$$B_t = 22,5 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,13}{22,5} (3 - 20) + 1 \right] \right\} = 39,89 \text{ ml}$$

Para el séptimo subexperimento:

$$B_t = 20,7 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,04}{20,7} (3 - 20) + 1 \right] \right\} = 36,70 \text{ ml}$$

Para el octavo subexperimento:

$$B_t = 19,2 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,96}{19,2} (3 - 20) + 1 \right] \right\} = 34,04 \text{ ml}$$

Para el noveno subexperimento:

$$B_t = 23,5 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,18}{23,5} (3 - 20) + 1 \right] \right\} = 41,66 \text{ ml}$$



A continuación se presenta una tabla resumen con todos los parámetros cinéticos y la cantidad de biogás acumulada que se puede obtener con un tiempo de retención de 20 días.

Tabla 17. Tabla resumen del cálculo de la cantidad acumulada de biogás utilizando la ecuación de Gompertz.

Subexperimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rmax (ml/día)	1,39	1,43	1,25	1,46	1,35	1,13	1,04	0,96	1,18
Bo (ml)	27,80	28,50	25	29,10	27	22,50	20,70	19,20	23,50
Λ (días)	2	2	3	2	2	3	3	3	3
tiempo de retención (días)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
B (ml)	50,32	51,59	44,32	52,68	48,88	39,89	36,70	34,04	41,66

Elaborado por: Autor

5.1.1.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS CON INÓCULO DE VACA

5.1.1.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental que se utilizó para realizar el análisis estadístico es un diseño de cribado factorial del tipo 2^3 teniendo las siguientes características:

Diseño Base

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 9, incluyendo 1 punto central por bloque
- Grados de libertad para el error: 2
- Aleatorizar: Sí

Tabla 18. Variables para el análisis estadístico para el experimento con inóculo de vaca.

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Inóculo	2,0	8,0	g/l	Sí
Temperatura	29,0	37,0	°C	Sí
Oligoelementos	0,0	2,0	g/l	Sí

Elaborado por: Autor



Tabla 19. Variable de Respuesta del análisis estadístico para el experimento con inóculo de vaca.

<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>
Biogás	ml

Elaborado por: Autor

5.1.1.2.2 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y VARIABLE DE RESPUESTA PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA

5.1.1.2.2.1 EFECTOS ESTIMADOS PARA BIOGÁS (ml) PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA.

Tabla 20. Efectos estimados para Biogás (ml) para el experimento con inóculo de vaca.

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	44,45	0,09	
A:Inóculo	3,33	0,19	1,0
B:Temperatura	12,79	0,19	1,0
C:Oligoelementos	2,37	0,19	1,0
AB	-2,07	0,19	1,0

Nota: Errores estándar basados en el error total con 4 g/l.

Elaborado por: Autor

5.1.1.2.2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BIOGÁS PARA EL EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA

Tabla 21. Análisis de Varianza para Biogás para el experimento con inóculo de vaca.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Inóculo	22,24	1	22,24	296,74	0,0001
B:Temperatura	327,42	1	327,42	4367,84	0,0000
C:Oligoelementos	11,28	1	11,28	150,49	0,0003
AB	8,57	1	8,57	114,32	0,0004
Error total	0,29	4	0,075		
Total (corr.)	369,81	8			

Elaborado por: Autor

Valores de coeficientes de relación:

- R-cuadrada = 99,92 porciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,84 porciento
- Error estándar del est. = 0,27
- Error absoluto medio = 0,15



- Estadístico Durbin-Watson = 1,753 (P=0,44)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,013

5.1.1.2.2.3 COEFICIENTE DE REGRESIÓN PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE VACA

Tabla 22. Coef. de regresión para biogás para experimento con inóculo de vaca.

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	-26,52
A:Inóculo (I)	3,40
B:Temperatura (T)	2,03
C:Oligoelementos (O)	1,19
AB	-0,086

Elaborado por: Autor

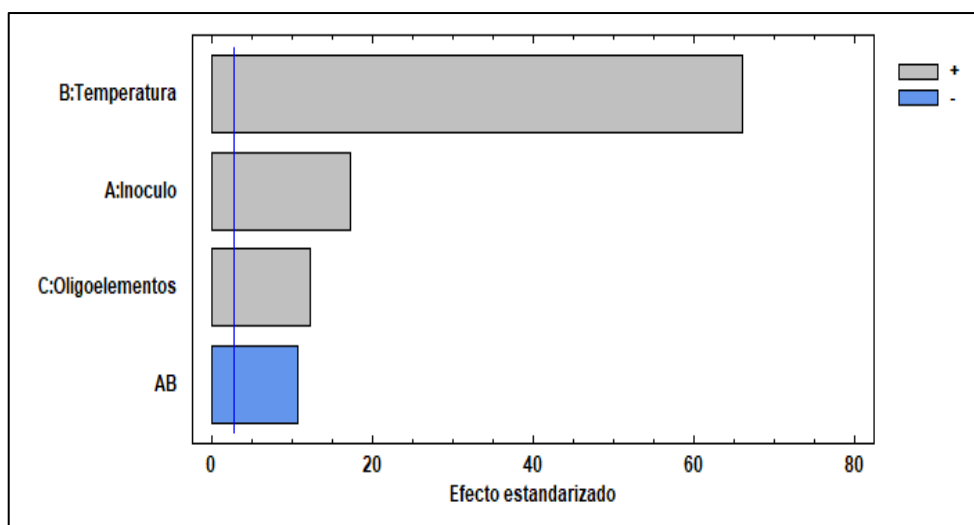
Con estos valores se genera una ecuación 2, la cual explica un modelo matemático de regresión para calcular el biogás que se puede obtener a partir del inóculo de vaca, como se muestra a continuación:

$$\text{Biogás (ml)} = -26,524 + 3.40208A + 2.03063B + 1,1875C - 0,08625AB \quad (2)$$

Ecuación 2. Ecuación de regresión para el biogás con inóculo de vaca.

También se procedió a realiza un diagrama de Pareto para analizar la importancia que tienen las variables y sus relaciones, cabe mencionar que para estandarizar el diagrama se excluyeron: la relación entre el inóculo y los oligoelementos (AC) y la relación entre la temperatura y los oligoelementos (BC), obteniendo como resultado la siguiente gráfica.

Gráfico. 2. Diagrama de Pareto Estandarizado para Biogás con Inóculo de Vaca.



Elaborado por: Autor

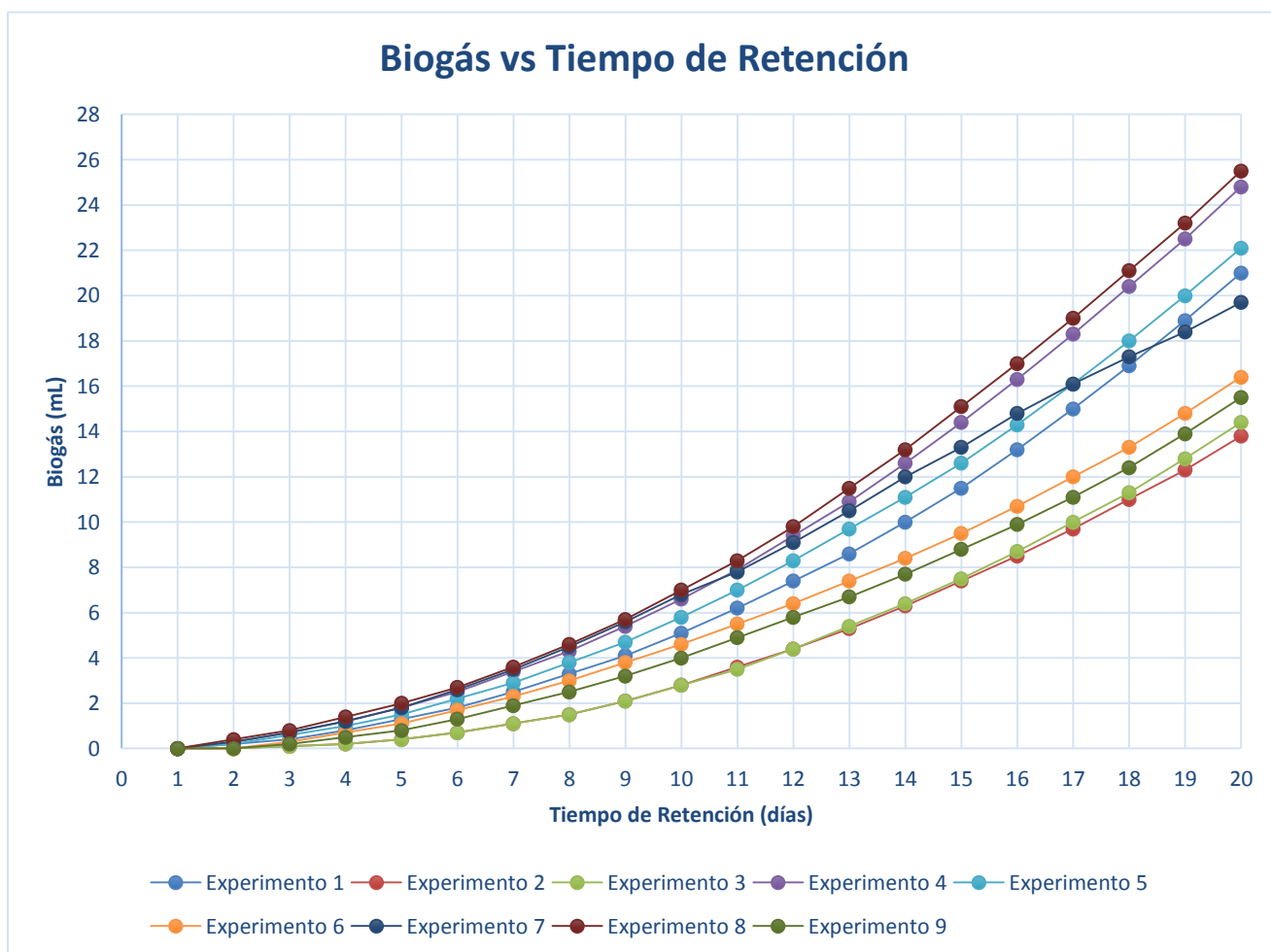


5.1.2 GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ART DE HIDRÓLIZADO DE CASCARILLA DE ARROZ CON INÓCULO DE CERDO

La generación de biogás se realizó siguiendo la metodología explicada en el capítulo anterior. En la siguiente tabla se puede observar los valores acumulados de los distintos Subexperimentos que se realizó durante el segundo ensayo que tuvo un tiempo de duración de 20 días.

También en el gráfico 3, se puede observar la tendencia que presenta cada subexperimento en cuanto a la relación entre la generación de biogás y el tiempo de retención.

Gráfico. 3. Generación Acumulada de Biogás a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de cerdo.



Elaborado por: Autor



Tabla 23. Generación Acumulada de Biogás (ml) a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de Hidrólizado de cascarilla de arroz con inóculo de cerdo.

Tiempo (días)	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2	0	0	0,3	0,2	0	0,3	0,4	0
3	0,4	0,1	0,1	0,7	0,6	0,3	0,7	0,8	0,2
4	0,8	0,2	0,2	1,2	1	0,7	1,2	1,4	0,5
5	1,3	0,4	0,4	1,8	1,5	1,1	1,8	2	0,8
6	1,8	0,7	0,7	2,5	2,2	1,7	2,6	2,7	1,3
7	2,5	1,1	1,1	3,4	2,9	2,3	3,5	3,6	1,9
8	3,3	1,5	1,5	4,3	3,8	3	4,5	4,6	2,5
9	4,1	2,1	2,1	5,4	4,7	3,8	5,6	5,7	3,2
10	5,1	2,8	2,8	6,6	5,8	4,6	6,8	7	4
11	6,2	3,6	3,5	7,9	7	5,5	7,8	8,3	4,9
12	7,4	4,4	4,4	9,4	8,3	6,4	9,1	9,8	5,8
13	8,6	5,3	5,4	10,9	9,7	7,4	10,5	11,5	6,7
14	10	6,3	6,4	12,6	11,1	8,4	12	13,2	7,7
15	11,5	7,4	7,5	14,4	12,6	9,5	13,3	15,1	8,8
16	13,2	8,5	8,7	16,3	14,3	10,7	14,8	17	9,9
17	15	9,7	10	18,3	16,1	12	16,1	19	11,1
18	16,9	11	11,3	20,4	18	13,3	17,3	21,1	12,4
19	18,9	12,3	12,8	22,5	20	14,8	18,4	23,2	13,9
20	21	13,8	14,4	24,8	22,1	16,4	19,7	25,5	15,5

Elaborado por: Autor



5.1.2.1 CÁLCULO DE BIOGÁS EN UN TIEMPO DE 20 DÍAS UTILIZANDO LA ECUACIÓN MODIFICADA DE GOMPERTZ PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO.

Se realizó el cálculo de la cantidad de biogás en ml que se podría generar con tiempo de retención del experimento por 20 días, para esto se utilizó la ecuación 1 que es la ecuación modificada de Gompertz y se procedió a reemplazar los resultados obtenidos en la ecuación 1 para cada subexperimento como se ve a continuación:

Para el primer subexperimento:

$$B_t = 21 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,05}{21} (1 - 20) + 1 \right] \right\} = 38,78 \text{ ml}$$

Para el segundo subexperimento:

$$B_t = 13,08 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,69}{13,08} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 24,98 \text{ ml}$$

Para el tercer subexperimento:

$$B_t = 14,4 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,72}{14,4} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 26,07 \text{ ml}$$

Para el cuarto subexperimento:

$$B_t = 24,8 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,24}{24,8} (1 - 20) + 1 \right] \right\} = 45,79 \text{ ml}$$

Para el quinto subexperimento:

$$B_t = 22,1 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,105}{22,1} (1 - 20) + 1 \right] \right\} = 40,81 \text{ ml}$$

Para el sexto subexperimento:

$$B_t = 16,4 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,82}{16,4} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 29,69 \text{ ml}$$

Para el séptimo subexperimento:

$$B_t = 19,7 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,985}{19,7} (1 - 20) + 1 \right] \right\} = 36,37 \text{ ml}$$

Para el octavo subexperimento:

$$B_t = 25,5 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{1,275}{25,5} (1 - 20) + 1 \right] \right\} = 47,08 \text{ ml}$$

Para el noveno subexperimento:

$$B_t = 15,5 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{0,775}{15,5} (2 - 20) + 1 \right] \right\} = 28,06 \text{ ml}$$

A continuación se presenta una tabla resumen con todos los parámetros cinéticos y la cantidad de biogás acumulada que se puede obtener con un tiempo de retención de 20 días.

Tabla 24. Tabla resumen del cálculo de la cantidad acumulada de biogás utilizando la ecuación de Gompertz para experimento con inóculo de cerdo.

Subexperimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rmax (ml/día)	1,05	0,69	0,72	1,24	1,10	0,82	0,98	1,27	0,77
Bo (ml)	21	13,80	14,40	24,80	22,10	16,40	19,70	25,50	15,50
Λ (días)	1	2	2	1	1	2	1	1	2
tiempo de retención (días)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
B (ml)	38,78	24,98	26,07	45,79	40,81	29,69	36,37	47,08	28,06

Elaborado por: Autor

5.1.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS CON INÓCULO DE CERDO

5.1.2.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO.

El diseño experimental que se utilizó para realizar el análisis estadístico es un diseño de cribado factorial del tipo 2^3 teniendo las siguientes características:

Diseño Base

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 9, incluyendo 1 punto central por bloque
- Grados de libertad para el error: 2
- Aleatorizar: Sí

Tabla 25. Variables para el análisis estadístico para experimento con inóculo de cerdo.

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Inóculo	2,0	8,0	g/l	Sí
Temperatura	29,0	37,0	°C	Sí
Oligoelementos	0,0	2,0	g/l	Sí

Elaborado por: Autor

<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>
Biogás	ml

5.1.2.3 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y VARIABLE DE RESPUESTA

5.1.2.3.1 Efectos estimados para Biogás (ml) para experimento con inóculo de cerdo.

Tabla 27. Efectos estimados para Biogás (ml) para experimento con inóculo de cerdo.

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	34,64	0,19	
A:Inóculo	4,76	0,40	1,0
B:Temperatura	15,49	0,40	1,0
C:Oligoelementos	1,62	0,40	1,0
AB	1,75	0,40	1,0

Nota: Errores estándar basados en el error total con 4 g/l.

Elaborado por: Autor

5.1.2.3.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO

Tabla 28. Análisis de Varianza para Biogás para experimento con inóculo de cerdo.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Inóculo	45,31	1	45,32	140,59	0,0003
B:Temperatura	480,19	1	480,19	1489,83	0,0000
C:Oligoelementos	5,216	1	5,22	16,18	0,0158
AB	6,16	1	6,16	19,11	0,0120
Error total	1,29	4	0,32		
Total (corr.)	538,17	8			

Elaborado por: Autor

Valores de coeficientes de relación:

- R-cuadrada = 99,76 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,52 por ciento
- Error estándar del est. = 0,57
- Error absoluto medio = 0,25
- Estadístico Durbin-Watson = 2,48 (P=0,82)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,29

5.1.2.3.3 COEFICIENTE DE REGRESIÓN PARA BIOGÁS PARA EXPERIMENTO CON INÓCULO DE CERDO

Tabla 29. Coef. de regresión para biogás para experimento con inóculo de cerdo.

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	-21,98
A:Inóculo (I)	-1,62
B:Temperatura (T)	1,57
C:Oligoelementos (O)	0,81
AB	0,073

Elaborado por: Autor

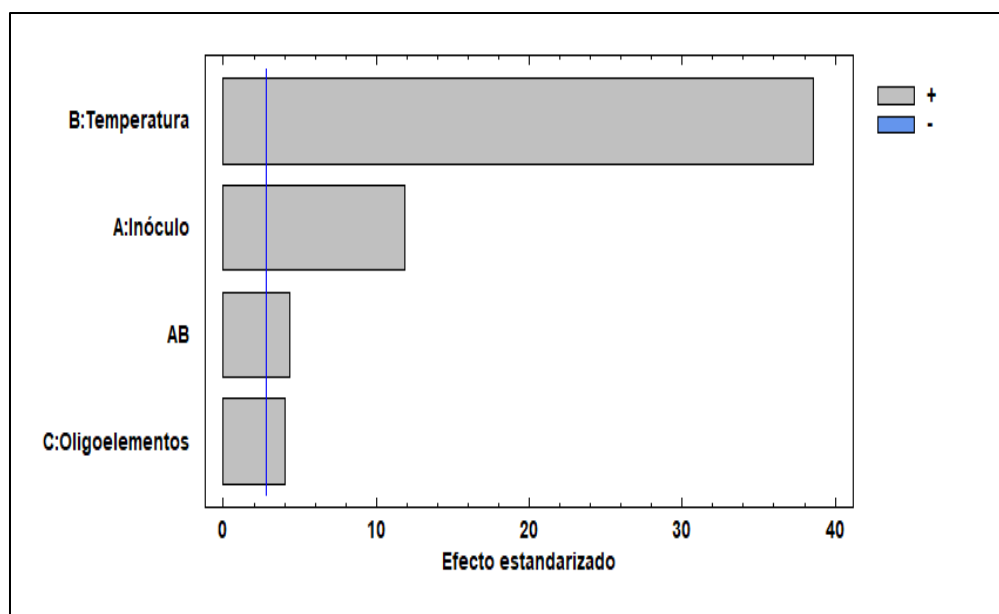
Con estos valores se genera una ecuación 3, la cual explica un modelo matemático de regresión para calcular el biogás que se puede obtener a partir del inóculo de cerdo, como se muestra a continuación:

$$\text{Biogás}(ml) = -21,98 - 1,62 * A + 1,57 * B + 0,81 * C - 0,067 * A * B \quad (3)$$

Ecuación 3. Ecuación de regresión para el biogás con inóculo de cerdo.

También se procedió a realiza un diagrama de Pareto para analizar la importancia que tienen las variables y sus relaciones, cabe mencionar que para estandarizar el diagrama se excluyeron: la relación entre el inóculo y los oligoelementos (AC) y la relación entre la temperatura y los oligoelementos (BC), obteniendo como resultado la siguiente gráfica.

Gráfico. 4. Diagrama de Pareto Estandarizado para Biogás con Inóculo de Cerdo.



Elaborado por: Autor

5.1.3 CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS DE ACUERDO AL RESIDUO NACIONAL DE CASCARILLA DE ARROZ.

De acuerdo a la información recopilada del informe de la Corporación Financiera Nacional (CFN), la producción de arroz con cáscara para el año 2016 fue de 1.534.537Tm. Revisando la literatura el peso de la cascarilla de arroz oscila entre el 20% al 33% del peso del grano (Rojas Sanchez, 2018, pág. 27), por lo que estimando un valor promedio de 26,5% y multiplicando este porcentaje por el valor total de arroz producido se obtuvo que el peso en toneladas métricas de la cascarilla de arroz es de 406.652,30Tm.

Trabajando con estos valores se puede estimar la cantidad de biogás a obtener con la cascarilla de arroz además de estimar la cantidad de energía generada del biogás. Si se trabaja con todo el residuo disponible omitiendo el 35% que es destinado para la industria florícola y para criaderos de animales se puede trabajar con el 65% restante obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 30. Cantidad de arroz y cascarilla de arroz disponible.

Cantidad de arroz producido (Tm)	% promedio peso de la cascarilla	Cantidad Cascarilla (Tm)	Cantidad Cascarilla Disponible (Tm)
1'534.537,00	26,50	406.652,30	264.323,99

Elaborado por: Autor

Hay que tener claro que para realizar esta estimación se trabajó con los valores de biogás en ml producidos por los dos tipos de inóculo.

Una vez que se tiene la cantidad de cascarilla de arroz disponible en Tm. se procede a realizar los siguientes cálculos empleando la ecuación 4 que nos sirve para obtener las toneladas métricas (Tm) de Azúcares Reductores Totales (ART) disponibles.

$$Tm \text{ de ART} = \frac{Tm_{ART \text{ iniciales}} * Tm \text{ cascarilla disponible}}{Tm \text{ cascarilla inicial}} \quad (4)$$

Ecuación 4. Toneladas métricas (Tm) de ART.

$$Tm \text{ de ART} = \frac{0,00002215Tm_{ART} * 264323,99Tm}{0,0001Tm}$$

$$Tm \text{ de ART} = 58.547,77Tm \text{ ART}$$

5.1.3.1 CANTIDAD DE BIOGÁS QUE SE OBTIENE CON INÓCULO DE VACA

Para realizar este cálculo se tomó el valor de 52,68ml de biogás obtenido mediante el modelo de Gompertz correspondiente al subexperimento 4 siendo el que más volumen produjo trabajando con una temperatura de

37°C, concentración de inóculo de 8g/l y de oligoelementos de 2g/l. Empleando la ecuación 5 podemos calcular la cantidad de biogás que se obtiene con inóculo de vaca.

$$\text{Cantidad de Biogás } m^3 = \frac{m^3 \text{ iniciales} * Tm \text{ ART disponibles}}{Tm \text{ ART iniciales}} \quad (5)$$

Ecuación 5. Cantidad de biogás que se obtiene a partir de las Tm de ART.

$$\text{Cantidad de Biogás } m^3 = \frac{0,00005268m^3 * 58.547,77Tm}{0,00002215Tm} = 139.245,88m^3$$

5.1.3.2 CANTIDAD DE ENERGÍA QUE SE OBTIENE A PARTIR DEL BIOGÁS

Revisando en la literatura según PRETELL SAMAN, 2017, pág. 20 en su trabajo nos indica que el biogás tiene una elevada capacidad calórica que va desde los 19,6 a 25 MJ/m³, por lo que se utilizó un valor promedio de 22,3MJ/m³ y empleando la siguiente ecuación se puede obtener cuanta energía es capaz de producir toda la cantidad de biogás obtenido a través de la cascarilla de arroz disponible. Empleando la ecuación 6 se puede calcular la cantidad de energía que se obtiene a partir del biogás generado con inóculo de vaca.

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = \frac{m^3 \text{ Biogas obtenidos} * \text{Capacidad Calorica Biogás(MJ)}}{1m^3 \text{ Biogás}} \quad (6)$$

Ecuación 6. Cantidad de Energía que se obtiene a partir del biogás.

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = \frac{139.245,88m^3 * 22,3MJ}{1m^3}$$

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = 3'105.183,17MJ$$

5.1.3.3 CANTIDAD DE BIOGÁS QUE SE OBTIENE CON INÓCULO DE CERDO

Para realizar este cálculo se tomó el valor de 47,08ml de biogás obtenido mediante el modelo de Gompertz correspondiente al subexperimento 8 siendo el que más volumen produjo trabajando con una temperatura de 37°C, concentración de inóculo de 8g/l y de oligoelementos de 2g/l. Empleando la ecuación 5 se calcula la cantidad de biogás que se obtiene a partir del inóculo de cerdo.

$$\text{Cantidad de Biogás } m^3 = \frac{0,00004708m^3 * 58.547,77Tm}{0,00002215Tm} = 124.443,78m^3$$

5.1.3.4 CANTIDAD DE ENERGÍA QUE SE OBTIENE A PARTIR DEL BIOGÁS

Para realizar el cálculo de la energía en esta parte se procedió de igual manera como se hizo con el biogás obtenido a partir del inóculo de vaca, mediante la siguiente ecuación. Empleando la ecuación 6 se calcula de la misma manera que como se realizó con el biogás generado a partir de inóculo de vaca y se obtiene la cantidad de energía que se puede generar con el biogás generado con inóculo de cerdo.

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = \frac{m^3 \text{ Biogas obtenidos} * \text{Capacidad Calorica Biogás(MJ)}}{1m^3 \text{ Biogás}} \quad (6)$$

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = \frac{124.443,78m^3 * 22,3MJ}{1m^3}$$

$$\text{Cantidad de Energía(MJ)} = 2'775.095,37MJ$$

5.1.3.5 CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA DEL BIOGÁS

Usando el factor de conversión en el que 1MJ es igual a 0,0002778MWh se puede estimar la cantidad de energía eléctrica que se podría producir, empleando la ecuación 7 se obtienen los resultados que se ven a continuación.

$$\text{Energía Eléctrica(MWh)} = \frac{MJ \text{ obtenidos} * 0,0002778MWh}{1MJ} \quad (7)$$

Ecuación 7. Cantidad de Energía Eléctrica que se obtiene a partir de la Energía obtenida del biogás.

5.1.3.5.1 CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL INÓCULO DE VACA.

$$\text{Energía Eléctrica(MWh)} = \frac{3'105.183,17MJ * 0,0002778MWh}{1MJ}$$

$$\text{Energía Eléctrica(MWh)} = 862,62MWh$$

5.1.3.5.2 CANTIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA QUE SE PUEDE OBTENER A PARTIR DE LA ENERGÍA OBTENIDA CON EL INÓCULO DE CERDO.

$$\text{Energía Eléctrica(MWh)} = \frac{2'775.095,37MJ * 0,0002778MWh}{1MJ}$$

$$\text{Energía Eléctrica(MWh)} = 770,92MWh$$

Tabla 31. Tabla resumen de la cantidad de biogás y energía que se puede obtener a partir de la cascarilla de arroz disponible en el Ecuador.

Tipo de Inóculo	Cantidad de Biogás (m ³) que se puede obtener	Cantidad de Energía que se puede producir (MJ/m ³)	Cantidad de Energía Eléctrica que se puede producir (MWh)
Excremento de vaca	139.245,88	3'105.183,17	862,62
Excremento de cerdo	124.443,78	2'775.095,37	770,92

Elaborado por: Autor

5.2 DISCUSIONES

En el presente estudio se realizó la generación de biogás partiendo de un hidrólizado de cascarilla de arroz, cuya composición se puede observar en la tabla N°8 y el mismo se utilizó como sustrato para el desarrollo de los microorganismos, también se varió algunos parámetros para estudiar la influencia de las variables para la generación de biogás en el proceso de la digestión anaerobia, los cuales fueron: temperatura, concentración y tipo de inóculo y concentración de oligoelementos.

Con los resultados obtenidos durante el proceso de biodigestión se puede realizar el siguiente análisis, para determinar la influencia de las variables en el proceso, también la relación entre las mismas y determinar las condiciones óptimas para realizar de una manera más eficiente la generación de biogás.

Arhoun, 2017, pág. 17, en su estudio “digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora” nos indica que el rango de temperatura para que se desarrollen los microorganismos mesófilos es de 35°C a 37°C, también nos menciona que el proceso de desarrollo de las bacterias que producen biogás va aumentar mientras aumente la temperatura de operación.

Analizando los resultados del primer experimento, se puede observar en la tabla N°16 que los subexperimentos: 4, 2, 1 y 5 son los que generaron mayor volumen de biogás y cabe mencionar que estos trabajaron a una temperatura de 37°C, lo que nos confirma lo que menciona Arhoun en su trabajo de investigación en contraste con los otros subexperimentos: 9, 7, 8, 6 que funcionaron a 29°C y el 3 a 33°C. Estos trabajaron a una temperatura inferior a la que se desarrollan las bacterias metanogénicas mesófilas.

En la tabla N°16 se puede apreciar que para que los experimentos: 4, 2, 1 y 5 fueran los que produjeron mayor volumen de biogás, tuvo que ver la relación la temperatura de digestión anaerobia con las otras variables como son en orden de importancia el inóculo y la concentración de oligoelementos.

Siendo el subexperimento 4 el que contó con la mejor combinación de variables favorables para que se generara mayor volumen de biogás que los subexperimentos: 2, 1 y 5 con los cuales la diferencia fue de la concentración de inóculo y de oligoelementos siendo: la temperatura de 37°C, la concentración de inóculo de 8g/l y la de oligoelementos de 2g/l. Lo que benefició para que este subexperimento generara 29,1ml de biogás, el subexperimento 2 tuvo una concentración de 2g/l de inóculo y 2g/l de oligoelementos, para el 1 fue 8g/l de inóculo y sin presencia de oligoelementos y finalmente para el 5 fue de 2g/l de inóculo y sin concentración de oligoelementos.

La diferencia del volumen generado de biogás del subexperimento 4 con los subexperimentos: 2, 1 y 5 fue de 0,6; 1,3 y 2,1 ml respectivamente, lo que nos da una idea clara de que la combinación adecuada de las



variables involucradas en la generación de biogás es muy importante, ya que se nota una marcada diferencia de volumen producido entre el subexperimento 4 y los otros subexperimentos.

Cárdenas Cleves et al, 2016, en su trabajo de investigación “perspectives of biochemical methane potential - bmp test for control the anaerobic digestion process of wastes” nos menciona que es muy importante la calidad, la cantidad del inóculo y más aún que se debe utilizar inóculos frescos, esto con el fin de disminuir el tiempo de adaptación de los microorganismos en el sustrato. Acarley García, 2018 en su trabajo “evaluación de la producción de metano a partir de las aguas mieles del beneficio húmedo del café mediante digestión anaerobia” nos dice que el inóculo debe ser homogéneo y libre de material extraño para evitar inhibiciones y también que los microorganismos del tipo mesofílicos se pueden emplear para el proceso siempre y cuando se tenga en cuenta la temperatura a la que se desarrollan estos.

Se afirma con el respaldo de la literatura que el subexperimento 4 es el que mayor volumen de biogás generó, ya que se trabajó con la mayor cantidad de inóculo y utilizando la parte fresca del mismo, teniendo un día de adaptación del mismo en el sustrato empleado. También se tomó en cuenta la temperatura de desarrollo de los microorganismos mesófilos y se trabajó a 37°C la cual es la adecuada para realizar este proceso. En cuanto a la concentración de oligoelementos Prabhudessai et al, 2013, nos indica en su trabajo “Biochemical methane potential of agro wastes” que no hay en la literatura un contenido de nutrientes establecidos para mejorar la generación de biogás. Pero hay que recordar que las bacterias anaerobias tienen vida y como todo ser vivo necesita de vitaminas y otros aditivos que ayuden en su desarrollo. Por ello se puede notar la diferencia de volumen de biogás generado entre el subexperimento 4 el cual tiene la mayor concentración de oligoelementos a diferencia de los subexperimentos 2, 1 y 5.

Evaluando los resultados mediante el modelo de Gompertz se puede apreciar en la tabla N°17 que el subexperimento 4 fue el que tiene mayor volumen de biogás generado con 52,68ml. Lo que nos indica que este es que tiene mejor capacidad para generar biogás de acuerdo a la combinación de variables con las que trabajo, las cuales favorecieron para que se de esto.

Para realizar un análisis estadístico de las variables involucradas se utilizó el programa estadístico Statgraphics Centurion XVII, el cual nos ayuda para identificar la importancia de cada una y la relación de las mismas, se puede observar en el Gráfico 2 en el diagrama de Pareto que la temperatura es la variable que mayor influencia tiene para la generación de biogás, como se menciona en la literatura que mientras más aumente la temperatura de la digestión anaerobia más aumentara la generación de biogás por parte de las bacterias metanogénicas.



Otra variable que es importante tomar en cuenta es el inóculo y su concentración, ya que al tener una mayor concentración del mismo ayuda a una adaptación más rápida de los microorganismos al sustrato y por lo tanto una generación más rápida del biogás. La concentración de oligoelementos también se encuentra dentro del diagrama, como ya mencionamos es importante su presencia porque ayuda a mejorar el desarrollo de los microorganismos, pero no obstante no afecta que no se encuentren presentes en el proceso de digestión anaerobia, debido a que las bacterias igualmente se siguen desarrollando.

El diagrama de Pareto también nos revela que la relación inóculo-temperatura es muy importante, ya que como nos menciona la literatura hay que tomar en cuenta el tipo de inóculo que se va a utilizar y la temperatura a la que se desarrollan los microorganismos presentes en él. Por lo tanto para mejorar la eficiencia de la generación de biogás hay que tomar en cuenta la importancia de estas variables de operación y la relación entre las mismas. Ya que un mejor manejo de estas puede generar un proceso más eficiente, el cual nos arroje mejores resultados.

En la tabla N°21 se pueden observar los valores del análisis de varianza para biogás con inóculo de vaca, los cuales nos sirven para obtener un coeficiente de correlación entre el biogás generado y las variables involucradas de 99,92% y el coeficiente ajustado es de 99,84% lo que nos da una clara idea de que la generación de biogás es directamente dependiente de las variables. También la tabla ANOVA particiona la variabilidad de Biogás en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99,92% de la variabilidad en Biogás. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,84%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,273793. El error medio absoluto (MAE) de 0,15463 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

También utilizando el programa estadístico se pudo obtener una ecuación de regresión para estimar la cantidad de biogás a que se podría obtener si se modificaran los valores de las variables que se emplean como son: temperatura, concentración de inóculo y concentración de oligoelementos. Como se puede



observar en la ecuación número 11, la cual nos muestra unos valores constantes los cuales son multiplicados por cada variable y por la relación de variables entre el inóculo y temperatura.

En la generación de biogás en el segundo experimento en el cual se utilizó como inóculo el excremento de cerdo, se cuantifico de igual forma que con el experimento 1 diariamente el volumen de biogás que se iba generando. Se trabajó con las mismas condiciones de operación que con el experimento 1, como se mencionó solo se modificó el tipo de inóculo para la generación de biogás.

Como se había mencionado la temperatura a la cual se lleva a cabo la digestión anaerobia es una variable muy importante, la cual influye directamente en el proceso de generación de biogás en cada subexperimento. Esta variable puede hacer que se obtenga mayor o menor volumen de biogás dependiendo a la temperatura que trabaje cada subexperimento. También se habló de que es muy importante en tener en cuenta que tipo de inóculo se está utilizando, es decir si este es de tipo mesofílico o termofílico, en este caso se usó un tipo de inóculo mesofílico cuyo rango de temperatura en el cual se desarrollan los microorganismos va desde 35°C a 37°C, siendo esta la temperatura ideal para llevar de una manera eficiente la digestión anaerobia para la obtención del biogás. Finalmente se hizo una acotación de que no hay establecido un valor estándar en cuanto a la adición de nutrientes como son los oligoelementos que son compuestos que pueden ayudar a mejorar el desarrollo de las bacterias metanogénicas y por ende obtener un mayor volumen de biogás como producto final, pero también cabe recordar que el proceso no se ve afectado sino se agregan los oligoelementos.

Una vez analizado todos estos parámetros se puede observar en la tabla N°11 los valores de cada variable, los cuales van a influir directamente en la generación de biogás. En cambio en la tabla N°23 se pueden observar los valores del volumen de biogás que se obtuvo en cada subexperimento siendo el subexperimento 8 y 4 los que mayor volumen de biogás generaron con una clara diferencia con el 1 y 5, los cuales se llevaron a cabo a la misma temperatura de operación que fue de 37°C, la diferencia entre estos fue los valores en cuanto a la cantidad de inóculo y de oligoelementos. El volumen generado por el subexperimento 8 fue de 25,5ml y del 4 de 24,8. La diferencia entre estos fue de 0,7ml esto se da debido a que el subensayo 8 tuvo una concentración de 8g/l de inóculo y 2g/l de oligoelementos y el 4 tuvo una igual concentración de inóculo que el 8 pero a este no se le adiciono oligoelementos que sirvan de nutrientes para las bacterias metanogénicas en el proceso de digestión anaerobia.

La diferencia de volumen producido entre el subexperimento 8 y los subensayos 1 y 5 fue de: 4,5ml y 3,4ml respectivamente. Nuevamente esta diferencia se marca por la concentración tanto de inóculo como de oligoelementos. Hay que mencionar que todos subexperimentos que son comparados trabajaron a la máxima



temperatura a la cual se desarrollan los microorganismos mesófilos siendo de 37°C, lo cual nos confirma la teoría que mientras más elevada sea la temperatura mayor será el desarrollo de los microorganismos y por ende más volumen de biogás se obtendrá.

El resto de subexperimentos como son: 2, 3, 6, 7 y 9 se llevaron a cabo por debajo de la temperatura de 35°C, la cual es la mínima para el desarrollo de los microorganismos mesofílicos, por lo que estos generaron menor volumen de biogás. Aunque algunos de estos trabajaron con mayor concentración de inóculo y oligoelementos que otros estos no llegaron a generar una gran cantidad de biogás, por lo que se confirma con la teoría que la temperatura influye directamente en el desarrollo de los microorganismos que son los responsables de generar biogás.

Utilizando la ecuación del modelo modificado de Gompertz, se puede observar en la tabla N°24 que el subexperimento 8 una vez más es el que tiene mayor cantidad de biogás generado con 47,08ml, siendo el que más se acerca a este valor el subexperimento 4 con 45,79ml. El modelo de Gompertz nos ayuda a visualizar la capacidad que tiene cada subexperimento para generar biogás. Por lo tanto estos dos subexperimentos son los que presentan mayor eficiencia en la generación de biogás en un tiempo de retención de 20 días. También nos ayuda este modelo para poder obtener los parámetros cinéticos como son el tiempo en días que se demoran en adaptar los microorganismos al sustrato. Con lo que así se puede determinar cuál es el subexperimento que puede dar mejores resultados si se optimizan los valores de las variables implicadas en el proceso de la digestión anaerobia.

Al igual que en el experimento 1 se realizó un diagrama de Pareto para identificar que variable tiene mayor importancia y la relación entre variables que son indispensables para el desarrollo de la digestión anaerobia. En el gráfico 4 se puede observar que la temperatura es la variable más importante en este proceso, seguida de la concentración de inóculo y la relación entre la temperatura y el inóculo y finalmente dentro del diagrama se observa la concentración de oligoelementos. Como se mencionó en el experimento 1 la temperatura de operación debe ser adecuada al tipo de inóculo que se está utilizando para la generación de biogás, por lo que es notable que se encuentre en el diagrama la relación entre estas dos variables. Es notable que la temperatura sea la principal variable en tomar en cuenta para este proceso, ya que si la temperatura es elevada y se tiene una máxima concentración de inóculo se va a tener mayor volumen de biogás en contraste con tener una máxima concentración de inóculo y una baja temperatura a la que se desarrollan los microorganismos, lo que nos va a dar un menor volumen de biogás. Y como se mencionó en párrafos



anteriores la presencia de oligoelementos puede ayudar a la eficiencia del proceso y la ausencia de estos no va a afectar al desarrollo de los microorganismos presentes.

En la tabla N°28 se pueden observar los valores obtenidos de cada variable para realizar un análisis de varianza en la producción de biogás con inóculo de cerdo. Teniendo como resultado un coeficiente de correlación entre el biogás y las variables involucradas en el proceso de 99,76% y un coeficiente de correlación ajustado de 99,52%, lo que nos indica que el biogás y las variables empleadas en este proceso de digestión anaerobia tienen una fuerte correlación.

La tabla ANOVA N°28 particiona la variabilidad de Biogás en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99,7604% de la variabilidad en Biogás. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,5209%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,567726. El error medio absoluto (MAE) de 0,25 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

Finalmente para este experimento en la tabla N°29 se pueden observar los valores constantes de cada variable para obtener una ecuación de regresión, con la cual se podrá estimar la cantidad de biogás que se puede obtener si se manipulan los valores de las variables empleadas como son: temperatura, concentración de inóculo y oligoelementos.

Realizando un análisis entre los 2 experimentos efectuados en la presente investigación se puede observar claramente que el experimento 1 en el cual se utilizó como inóculo el excremento de vaca generó mayor cantidad de biogás que el experimento 2 que tuvo como inóculo excremento de cerdo. Siendo el subexperimento 4 del experimento 1 el que mayor volumen de biogás generó con 29,1 ml en diferencia con el subexperimento 8 del experimento 2 que generó 25,5ml de biogás.



En cuanto al tiempo de adaptación del inóculo al sustrato que en este caso fue una solución de azúcares reductores totales de hidrólizados de cascarilla de arroz con una concentración de 22°Brix. Hay que mencionar que el inóculo de cerdo tuvo un menor tiempo de adaptación de máximo 2 días a diferencia del inóculo de vaca que se demoró hasta máximo 3 días de adaptación. Hay que tomar en cuenta que el tiempo de adaptación del inóculo en el sustrato es la fase más importante en el proceso, ya que mientras más rápido

se adapte el inóculo al sustrato más rápido se comenzaran a desarrollar las bacterias metanogénicas y por ende más producción de biogás se podrá obtener. Pero en este caso aunque más rápido se haya adaptado el inóculo de cerdo no generó mayor volumen de biogás que el inóculo de vaca, esto se debe a que el excremento de cerdo tiene mayor cantidad de bacterias metanogénicas presentes en su composición, además de que el excremento por su alto contenido de humedad se degrada de manera más acelerada que el de vaca.

Se realizó una estimación del biogás que se puede obtener utilizando 506.397,21Tm. Que es la cascarilla de arroz que se encuentra disponible a nivel nacional según los cálculos que se efectuaron para obtener este valor, tomando en cuenta que según el informe de la Corporación Financiera Nacional (CFN) del año 2018 la cantidad de arroz producido fue de 1'534.537,00Tm. Para obtener la cantidad de cascarilla disponible también se utilizó un promedio del porcentaje del peso de la cascarilla de arroz que fue de 26,5% del peso del grano.

Con estos valores se calculó la cantidad de Azúcares Reductores Totales (ART) que fue de 264.323,99Tm con los cuales se realizó un estimado de la cantidad de biogás en m^3 que se puede generar utilizando los dos tipos de inóculo trabajando con las mismas condiciones que los experimentos realizados en esta investigación, como son: a una temperatura de 37°C, con una concentración de 8g/l y 2g/l de oligoelementos. Una vez establecidas estas variables se realizó la estimación tomando los volúmenes más altos de biogás obtenidos tanto con el inóculo de vaca y con el de cerdo dándonos los siguientes resultados: 139.245,88 m^3 y 124.443,78 m^3 respectivamente.

Con estos valores de biogás se volvió a realizar una estimación de la cantidad de energía en MJ/m^3 que se podría obtener de emplear toda la cantidad de biogás obtenida, tanto con el inóculo de vaca como con el de cerdo, dándonos los siguientes valores: 3'105.183,17 MJ/m^3 y 2'775.095,37 MJ/m^3 respectivamente.

Transformando la energía que libera el biogás a MWh, podemos ver que la energía que se obtendría con el inóculo de vaca generaría mayor energía eléctrica con 862,62MWh a diferencia del 770,92MWh que se obtendrían con el inóculo de cerdo. Esta cantidad de energía eléctrica se podría aprovechar ya sea por la red nacional de energía del estado o por una empresa que quiera implementar una nueva fuente de energía renovable y amigable con el medio ambiente.



6. CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto de investigación se logró realizar la generación y cuantificación de biogás a partir de Azúcares Reductores Totales (ART) de hidrólizado de cascarilla de arroz, cuya composición se puede observar en la tabla N°8. Mediante el cual nos pudimos dar cuenta que los azúcares reductores totales son un buen sustrato para que las bacterias metanogénicas se desarrollen, las cuales son las responsables de la producción de biogás.

Podemos mencionar que el sistema experimental que se empleó para realizar la generación y cuantificación de biogás fue muy útil a pesar de ser un sistema sencillo, nos fue útil para poder obtener muy buenos resultados como son los grandes volúmenes de biogás obtenidos durante este ensayo.

Hay que indicar que se aplicó la ecuación modificada de Gompertz, la cual nos fue útil para estimar que experimento es el que tiene mejor capacidad de generar biogás, también nos permite obtener los mejores parámetros cinéticos para hacer más eficiente el proceso de generación de biogás. Al tener menor tiempo de adaptación de las bacterias al sustrato se tiene un mejor proceso de digestión anaerobia y por lo tanto una mejor producción de biogás.

Se logró establecer que durante este estudio, que la máxima concentración de inóculo óptimo para obtener el mayor volumen de biogás es de 8g/l, siendo este del tipo de inóculo mesofílico de excremento de vaca, en el cual sus bacterias logran desarrollarse de mejor manera a una temperatura de 35°C a 37°C. Además se puede mencionar que el inóculo de vaca tiene mejor capacidad de generar biogás que el inóculo de cerdo, debido a que en el excremento de vaca se encuentra una mayor concentración de bacterias metanogénicas responsables de producir biogás.

Se realizó un diagrama de Pareto para cada experimento con el cual se puede evidenciar que la variable que mayormente influye en el proceso es la temperatura a la que se lleva a cabo la digestión anaerobia, la concentración de inóculo también es importante tomar en cuenta ya que mientras más concentración ayudara a que más biogás se genere.



Aunque la concentración de oligoelementos se encuentra dentro del diagrama demostrando que es una variable importante para el proceso, pero durante la realización de esta investigación y confirmando con la literatura se puede mencionar que no afecta al proceso si no se adiciona oligoelementos. Finalmente se puede mencionar que hay una relación entre variables que hay que tomar muy en cuenta, ya que el tipo de inóculo debe ir de acuerdo a la temperatura de crecimiento de las bacterias presentes en el mismo.

Una vez realizada la estimación de la cantidad de energía que se puede obtener a partir de los Azúcares Reductores Totales (ART) disponibles de la cascarilla de arroz a nivel nacional. Se puede decir, que se puede obtener una elevada cantidad de energía y una gran capacidad de generar energía eléctrica que puede contribuir a sectores aledaños de las plantas de generación. También podemos mencionar que el emplear el biogás como una fuente de energía renovable resulta algo muy beneficioso debido a su elevada capacidad calorífica y capacidad de generar electricidad. Por lo que es viable el realizar un proyecto a futuro de la generación de biogás a partir de los ART de hidrólizados de cascarilla de arroz usando como inóculo el excremento de vaca.

Finalmente podemos mencionar que el usar la cascarilla de arroz para obtener los azúcares reductores totales mediante hidrólizados para la generación de biogás en el Ecuador, presenta muchas ventajas al ser un residuo del tipo lignocelulósico este no va a afectar a la seguridad alimentaria. Puesto que siempre hay controversia en el usar ya sea productos alimenticios o residuos de los mismos para realizar biocombustibles como una nueva fuente de energía renovable.

6.2 RECOMENDACIONES

Realizar un conteo de las bacterias iniciales independientemente del tipo de inóculo que se esté empleando, ya que esto nos va ayudar a seleccionar el inóculo que mayor cantidad de bacterias metanogénicas tenga en su composición con el fin de obtener mayor volumen de biogás generado. También esto nos va ayudar para poder obtener la variable cinética de Gompertz que es el λ , que representa el tiempo de adaptación de las bacterias al sustrato.

Para poder medir el volumen de biogás generado de una manera más exacta se recomienda utilizar otros métodos como el manométrico, ya que si se lo realiza por el método volumétrico puede existir fugas al ser una técnica sencilla y que usa conexiones entre el biorreactor y el frasco donde se encuentra la solución de KOH al 5%, por lo que podría existir fugas y no nos daría el volumen real y exacto del biogás que se ha generado durante el tiempo de la digestión anaerobia.

Para realizar la precipitación del dióxido de carbono (CO_2) que proviene del gas generado en el biorreactor además de utilizar KOH al 5%, también se puede utilizar NaOH al 5% o se podría investigar en una mejor



Universidad de Cuenca

solución que sea más económica y que logre hacer precipitar toda la concentración de CO_2 para obtener la mejor concentración de metano (CH_4) dándonos un biogás más puro y con una mejor eficiencia energética al estar libre de trazas de contaminantes.

En cuanto al aprovechamiento energético del biogás, usando los azúcares reductores totales de hidrolizados de cascarilla de arroz disponibles en el país, se debe tomar en cuenta para la puesta en marcha de un proyecto

como este el poder utilizar el mayor porcentaje de cascarilla de arroz disponible para así poder obtener la mayor cantidad de energía que beneficie ya sea al sector público en la red nacional de energía o de una empresa que quiera utilizar un medio de energía amigable con el medio ambiente.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Acarley García, F. E. (2018). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LAS AGUAS MIELES DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA. *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA*, 21-30.
- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 206-212.
- ARCONEL. (2016). Proyecto de biogás Relleno Sanitario El Inga I y II. *AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD*.
- Arellano, L., Cruz Rosales, M., & Huerta, C. (2014). El estiércol: material de desecho, de provecho y algo más. *INECOL.*, 5-6.
- Arhoun, B. (2017). DIGESTIÓN Y CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS, GANADEROS Y LODOS DE DEPURADORA. *UNIVERSIDAD DE MALAGA*, 14-17.
- Arias, A. M. (2017). REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES CON EFECTO INVERNADERO (GEIS) EN EL SECTOR ENERGÉTICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES. *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.*, 1-3.
- Belduma Zambrano, A. M. (2015). Evaluación de producción de biogás a partir de la degradación de gallinaza sometida a diferentes relaciones C/N. *Universidad Técnica de Machala*, 24-29.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheik, B., & Hadmi, M. (2015). BIOREACTOR PERFORMANCE IN ANAEROBIC DIGESTION OF FRUIT AND VEGETABLES WASTES. *PROCESS BIOCHEMISTRY.*, 3-4.
- Cantuña Cóndor, L. K. (2018). EVALUACIÓN POR VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE SUERO LÁCTEO DE LA QUESERÍA ARTESANAL DE LA ZONA RURAL DE MACHACHI INOCULADO CON ESTIÉRCOL BOVINO. *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.*, 14-36.
- Cárdenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C. H. (2016). PERSPECTIVES OF BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL - BMP TEST FOR CONTROL THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS OF WASTES. *UNIVERSIDAD DEL VALLE CALLE*, 97-104.
- Científicas, C. S. (2013). Digestión anaeróbica. *AGROWASTE*, 1-10.
- Corporación Financiera Nacional (CFN). (2018). *FICHA SECTORIAL: Arroz*.



- Cotrina, S., Chávez, P., García, R., Morán, A., Salgado, J., & Seminario, L. (2016). DISEÑO Y PRUEBA PILOTO DE UN MODELO DE CAPACITACIÓN EN EL APROVECHAMIENTO DE LA CASCARILLA DE ARROZ A TRAVÉS DE LA ELABORACIÓN DE ENVASES BIODEGRADABLES EN SAN LORENZO. *UNIVERSIDAD DE PIURA.*, 36-37.
- Demera Centeno, S., & Bogar., R. R. (2018). EVALUACIÓN DEL USO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) COMO AGREGADO EN BLOQUES PARA LA CONSTRUCCIÓN. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ*, 13-14.
- Díaz, J., Miranda, A., & Almirall, E. (2016). METODOLOGÍA PARA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE COSECHAS DEL ARROZ UTILIZANDO COMO INÓCULO AGUAS RESIDUALES. *REVISTA CIENTÍFICA AVANCES.*, 326.
- Escobar Morales, D. A. (2015). Diseño y factibilidad de una planta de biogás en una vitivinícola. *Universidad del Bío-Bío*, 8.
- Flores Hidalgo, D. E. (2014). "POTENCIAL METANOGÉNICO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS ESPECÍFICOS DISPONIBLES EN LAS FINCAS AGRÍCOLAS COSTARRICENSES PARA COGENERACIÓN". *INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA*, 19-22.
- García Rodríguez, A., & Gómez Franco, J. (2016). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS VEGETALES OBTENIDOS EN LA CENTRAL DE ABASTOS DE BOGOTÁ MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA. *FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA*, 27-28.
- Godoy Zúñiga, M. E., Silva Recalde, M. F., & Palacios Fuentes, J. A. (2018). LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR DEGRADACIÓN DE ABONO ORGÁNICO COMO ALTERNATIVA DE ENERGÍA EN ECUADOR. *DELOS (DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE).*, 6-7.
- González Cabrera, A. M. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión. *Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.*, 27-30.
- Gualoto Tituaña, K. X. (2018). "APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DEL GANADO BOVINO DE LA PLANTA DE FAENAMIENTO DEL CANTÓN FRANCISCO DE ORELLANA PARA OBTENCIÓN DE BIOL. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.*, 16.
- Holguín, J. C. (18 de JUNIO de 2017). BIOGÁS, ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA CUIDAR EL AMBIENTE. *EL TELÉGRAFO*.
- INER. (2019). Biomasa. *Obtenido de: <http://www.iner.gob.ec/biomasa/>.*
- Julio Guerrero, I. C. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la codigestión digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos. *Universidad de Antioquia.*, 6.
- Kummamuru, B. (2014). WBA Global Bioenergy Statistics 2014. *World Bioenergy Association*, 59.
- Lino Alvarado, Y. F., & Ochoa Tenorio, L. M. (2017). COSTEO DE LOS SUBPRODUCTOS DERIVADOS DEL ARROZ. *Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil.*, 13.
- López Martínez, G. (2013). Método no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia. *revistacientifica.*, 1-16.



- Lorente, L., Collaguazo, G., Herrera, I., & Lastre, A. (2018). DISEÑO DE BIODIGESTOR A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA E INDUSTRIALIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES. *DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE (DELOS)*, 1.
- Macedo Linarez, D. (2015). EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL ESTIÉRCOL DE VACA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE DE LA ESPECIE *Pennisetum sp* (MARALFALFA) EN CONDICIONES DEL VALLE DEL ALTO. *Universidad Privada Antenor Orrego*, 17.
- MAGAP. (2014). ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA ECONÓMICA DEL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza sativa*) EN EL ECUADOR A ESCALA 1:250.000. *COORDINACIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL*, 1.
- Maspolim, Y., Zhou, Y., Chenghong, G., Xiao, K., & Jern, W. (2015). COMPARISON OF SINGLE-STAGE AND TWO-PHASE ANAEROBIC SLUDGE DIGESTION SYSTEMS PERFORMANCE AND MICROBIAL COMMUNITY DYNAMICS. *CHEMOSPHERE*, 140, 54-62.
- Orskov, B., Yongabi, K., Subedi, M., & Smith, J. (2014). Overview of Holistic Application of Biogas for Small Scale Farmers in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, 6.
- Ortiz González, Y. M. (2017). CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL DE BIGÁS. *ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTAO*, 10.
- Pabuena Acosta, M., & Pasqualino, J. (2014). POTENTIAL USES OF BIOGAS IN COLOMBIA. *TEKNOS*, 28.
- Padilla Sevillano, A., & Rivero Méndez, J. (2016). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y COMPOST A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS RECOLECTADOS DEL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO HUACA DE LA LUNA. *REVISTA CIENCIA Y TECNOLOGIA*, 37.
- Parra Huertas, R. A. (2015). DIGESTIÓN ANAERÓBICA: MECANISMOS BIOTECNOLÓGICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. *PRODUCCIÓN + LIMPIA*, 143.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordoñez, J. (2015). Efecto de la relación sustrato – inóculo sobre el potencial bioquímico del metano de bioresiduos de origen municipal. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 515-526.
- Prabhudessai, V., Ganguly, A., & Mutnuri, S. (2013). Biochemical methane potential of agro wastes. *Journal of Energy*, 1-7.
- Pretell Saman, C. F. (2017). PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EXCRETAS DEL GANADO BOVINO DEL ESTABLO MONTEVERDE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA Y SU USO EN EL ORDEÑO MECÁNICO. *UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO*, 20-21.
- Rodríguez Pachón, D., & García Cepeda, A. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE HECE CANINAS. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*, 13.
- Rojas Sanchez, C. A. (2018). GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA REDUCIR COSTOS ENERGÉTICOS EN LA PILADORA LA MERCED S.R.L. *UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO*, 18-30.



- Romero Espinoza, C. D. (2018). OBTENCIÓN DE AZÚCARES TOTALES A PARTIR DE LA CÁSCARA DE ARROZ (ORYZA SATIVA) MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA ALTERNA. *UMATCH*, 17.
- Serrano, A., Siles, J., Chica, A., & Martín, Á. (2013). Agri-food waste valorization through anaerobic co-digestion: fish and strawberry residues. *J. Clean.*, 125-132.
- Siguencia, J., Soler, J., & Menéndez, M. (2018). Hidrólisis ácida de cascarilla de arroz para la generacion de. *Revista "Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A"*, vol. 6, 2.
- Surendra, K., Takara, D., Hashimoto, A., & Khanal, S. (2014). BIOGAS AS A SUSTAINABLE ENERGY SOURCE FOR DEVELOPING COUNTRIES: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES K.C. *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 848.
- Viglizzo, E. F. (2016). Cambio climático y seguridad alimentaria global: Oportunidades y amenazas para el sector rural argentino. *Anales ANAV*, 159.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Revisión de la digestión anaerobia de residuos de alimentos para la producción de biogás. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 383-392.

ANEXOS

- **MUESTREO DEL EXCREMENTO DE VACA**

Muestreo en la Granja de la Universidad Politécnica Salesiana ubicada en el cantón Paute.



- **SEPARACIÓN DE LAS VACAS ADULTAS Y LOS TERNEROS**

Ubicación de los terneros



Ubicación de las vacas adultas



- **IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE ALIMENTACIÓN DE LAS VACAS Y TERNEROS.**

Alimentación de los terneros: ellos se alimentan con alfalfa



- Alimentación de las vacas adultas: ellas se alimentan con maralfalfa



- **RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXCREMENTO DE LOS TERNEROS Y DE LAS VACAS ADULTAS**

Recolección de la muestra de excremento de los terneros





- Recolección de muestras de las vacas adultas.



